



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO

**FACOLTA' DI INGEGNERIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE**

**Studio Fluidodinamico di Ottimizzazione di Forma
in Campo Automobilistico e Navale,
con Implementazione dei Codici CFD nei Software VPP**

Tesi di Dottorato di Ricerca

di

Sergio Milone

XXII CICLO - DOTTORATO DI RICERCA IN PROGETTAZIONE MECCANICA

Settore scientifico disciplinare: ING-IND/14



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO

**FACOLTA' DI INGEGNERIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE**

**Studio Fluidodinamico di Ottimizzazione di Forma
in Campo Automobilistico e Navale,
con Implementazione dei Codici CFD nei Software VPP**

Tesi di Dottorato di Ricerca di:

Sergio MILONE

Tutor:

Prof. Gabriele VIRZÌ MARIOTTI

Coordinatore del dottorato:

Prof. Gabriele VIRZÌ MARIOTTI

XXII CICLO - DOTTORATO DI RICERCA IN PROGETTAZIONE MECCANICA

Settore scientifico disciplinare: ING-IND/14

Sommario

Scopo della ricerca.....	5
1. Introduzione	7
2. CFD - Computational Fluid Dynamics.....	9
2.2 Struttura di un codice CFD	10
2.2.1 Pre-Processing	10
2.2.2 Solving (<i>Processing</i>)	11
2.2.3 Post-processing	12
2.3 Modelli di Turbolenza	12
2.3.1 Modello di turbolenza K - ϵ	13
2.3.2 Modello di turbolenza K - ω	13
3. Ottimizzazione della center-line di un'autovettura da turismo	15
3.1 Introduzione	15
3.2 Aerodinamica di un'automobile	16
3.3 Fiat Bravo 2007	18
3.3.1 Pre-Processing	19
3.3.2 Solving.....	23
3.3.3 Post-Processing	25
3.3.4 Metodo di White	28
3.3.5 Modifiche della geometria della Fiat Bravo 2007.....	31
3.4 Conclusioni	41
4. Sostentatori idrodinamici	44
4.1 Introduzione	44
4.2 Progetto dei sostentatori idrodinamici.....	48
4.3 Analisi CFD.....	50
4.3.1 Pre-Processing	50
4.3.2 Solving.....	55
4.3.3 Post-Processing	55
4.4 Conclusioni	59
5 Interazione albero-vela al variare della forma della sezione dell'albero.....	60
5.1 Introduzione	60
5.2 Analisi CFD	62
5.2.1 Pre-Processing	62

5.2.2 Solving.....	68
5.2.3 Post-Processing	69
6. Analisi delle prestazioni di un armo CAT con sola randa e boma tipo wishbone, dotato di albero rotante a profilo alare	76
6.1 Introduzione	76
6.2 Analisi CFD.....	77
6.2.1 Pre-Processing.....	77
6.2.2 Solving.....	84
6.2.3 Post-Processing	88
6.3 Conclusioni	93
7. VPP e integrazione CFD-VPP.....	95
8. Case Study: Maribelle.....	98
8.1 La barca a vela	98
8.1.1 Le carene.....	98
8.1.2 Le vele.....	104
8.1.3 Maribelle.....	108
8.2 Analisi delle prestazione mediante VPP "Windesign".....	112
8.3 Analisi CFD di scafo, appendici e piano velico di Maribelle.....	118
8.3.1 Scafo	118
8.3.2 Appendici	124
8.3.3 Randa.....	127
8.4 Risultati del VPP Windesign.....	131
BIBLIOGRAFIA.....	140

Scopo della ricerca

La ricerca si propone lo studio delle forme e delle strutture di elementi quali carena e appendici di carena di un'imbarcazione al fine di determinare le caratteristiche morfologiche e meccaniche che maggiormente ne influenzano le prestazioni. Mediante la fluidodinamica numerica sarà possibile progettare gli elementi considerati. I metodi CFD forniscono uno strumento ormai essenziale per la profilatura preliminare di carene ed appendici; con l'utilizzo di codici CAD e CFD è possibile, infatti, determinare un range di configurazioni geometriche e di condizioni idrodinamiche senza il ricorso alle prove in vasca, limitando spesso le prove sperimentali alla calibrazione delle procedure numeriche ed alla successiva validazione dei risultati ottenuti con le simulazioni numeriche.. Tali indagini preliminari hanno lo scopo di riprodurre il comportamento degli elementi oggetto dello studio mediante modelli numerici riproducenti le geometrie oggetto di analisi; in tal modo è possibile modificare i parametri del solutore CFD sulla base dei risultati ottenuti dalle prove sperimentali. Le geometrie degli elementi considerati possono essere elaborate tramite modellatori NURBS quali Rhinoceros, utilizzato frequentemente in ambito navale; esempi di superfici ottenute tramite tale software sono mostrati nella figura 1.

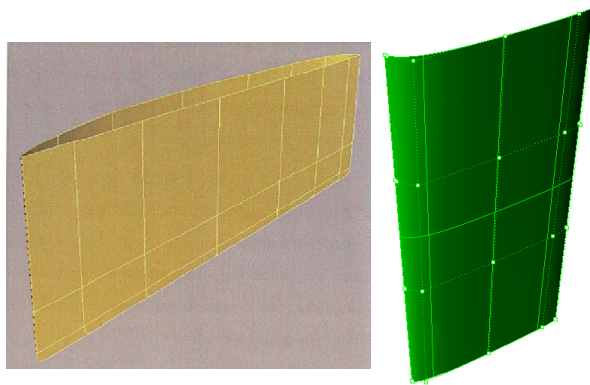


Figura 1 Esempi di superfici ottenute con il software Rhinoceros.

Le superfici ottenute potranno essere esportate in formato IGES in modo da poter essere utilizzate da altri software.

Il passo successivo è quello della costruzione dei volumi di controllo in forma parametrica (che ci darà la possibilità di variare tali volumi modificandone alcuni valori); dopo l'importazione del file IGES delle superfici, il primo passo per la realizzazione del volume di controllo è quello di

definire i vertici estremi di tale volume; successivamente si tracciano gli spigoli, congiungenti i vertici, che servono alla costruzione delle facce esterne del dominio. La fase successiva è quella della discretizzazione del dominio, con la generazione di mesh adeguate allo studio in esame; la mesh deve essere in grado di riprodurre con sufficiente accuratezza le variazioni geometriche degli elementi e di tenere in giusta considerazione le variazioni dei parametri caratterizzanti il flusso fluido. Esempi di tale procedimento sono mostrati nella figura 2.

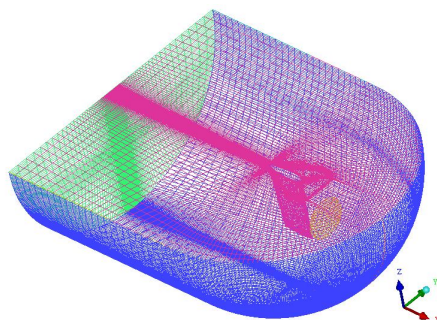


Figura 2 Esempio di discretizzazione del dominio.

La verifica numerica per mezzo del codice Fluent, infine, ci fornisce delle informazioni fondamentali per le successive modifiche da apportare ai progetti prima di effettuare le prove sperimentali. Tale software fornisce la massima flessibilità nel risolvere i problemi della fluidodinamica numerica, supportando tutti i principali formati di mesh, sia bidimensionali che tridimensionali e potendo operare con fluidi comprimibili e incompressibili, in moto laminare e turbolento, in una vasta gamma di condizioni fluidodinamiche, senza vincoli sulla geometria da studiare; esempi di analisi fluidodinamica sono mostrati nella figura 3.

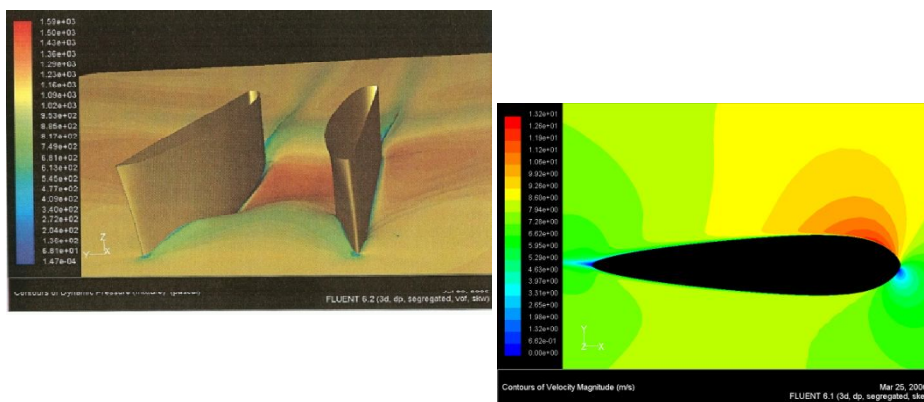


Figura 3 Esempi di risultati ottenuti mediante analisi CFD.

1. Introduzione

Nel corso dei tre anni di dottorato di ricerca ho effettuato studi rivolti prevalentemente alla fluidodinamica computazionale con particolare attenzione a scafi e a piani velici di imbarcazioni a vela, ad imbarcazioni multiscafo per il trasporto passeggeri e ad autovetture da turismo.

Il percorso di ricerca è stato preceduto da un periodo abbastanza lungo di studio dei fenomeni fluidodinamici, di addestramento all'utilizzo di software specifico per tale tipo di analisi e alla lettura di testi specifici sulla computational fluid dynamic (Anderson, J.D., 1995; Versteeg, H.K., e Malalasekera, W., 1995) e della letteratura scientifica relativa a questo settore della ricerca.

I primi lavori di rilievo hanno avuto come oggetto lo studio dell'interazione tra albero e randa di una barca a vela con lo scopo di cercare la forma "migliore" da dare alla sezione trasversale dell'albero al fine di ridurre il più possibile il decadimento del rendimento della vela nella zona in cui essa viene "disturbata" dalla presenza dell'albero, zona in cui l'aria non riesce a seguire indisturbata la forma della vela a causa del "salto" che l'albero induce e che genera vortici turbolenti e "bolle" di distacco della vena fluida.

Successivamente ho analizzato le prestazioni di un armo tipo cat con boma wishbone che equipaggia un'imbarcazione a vela di nuova concezione, dotato di albero a sezione trasversale di forma alare, ruotante in modo da avere sempre il miglior angolo di incidenza al vento in tutte le andature. Questa scelta permetterebbe di avere un miglioramento del rendimento della vela che può arrivare anche al 40% rispetto ad un normale albero fisso, insartiato, a sezione circolare.

L'approccio allo studio fluidodinamico degli scafi è stato complesso perché il passaggio da un'analisi monofase ad un'analisi bifase è molto più complessa di quanto si possa pensare. I fluidi che investo lo scafo sono due, acqua e aria, con densità molto differenti (l'acqua è mille volte più densa dell'aria), cosa che complica estremamente il processo analitico soprattutto in relazione allo sforzo da profondere nella "costruzione" della mesh che conta un numero molto maggiore di elementi rispetto ad un'analoga analisi monofase, e una precisione molto maggiore per una buona valutazione della superficie d'interfaccia tra le fasi.

La formazione ondosa, generata dall'interazione tra i due fluidi aventi diversa densità attraversati da un corpo nella loro interfaccia, è infatti cosa molto complessa da ottenere in un'analisi CFD e una buona parte della mia ricerca ha riguardato la determinazione della corretta impostazione dei molteplici parametri del solutore (fluent) per poter ottenere una formazione ondosa aderente alla realtà con un'analisi di tipo "steady", cioè "stazionaria". In questo modo è stato possibile effettuare un gran numero di analisi su scafi con assetti differenti nel più breve tempo possibile (compatibilmente con gli strumenti hardware disponibili).

A titolo meramente esplicativo basti pensare che un'analisi non-stazionaria (unsteady) su uno scafo di circa 4.5 metri con una mesh di 3 milioni di elementi impiega circa 3-4 giorni per raggiungere la convergenza; un'analisi stazionaria, invece, impiega non più di 5 ore. Va da sé che se lo strumento "CFD" è utilizzato in ambito comparativo, cioè per confrontare differenti soluzioni simili tra loro ma con differenze che ne modificano il comportamento fluidodinamico, la necessità di effettuare molte analisi è prioritaria. Proprio per questo l'importanza di far "funzionare" un'analisi bifase in modalità stazionaria diviene fondamentale.

Le prime analisi bifase hanno riguardato un catamarano a scafi asimmetrici con condotto convergente - divergente precedentemente ottimizzato nella forma nel nostro dipartimento; abbiamo introdotto due ali tra gli scafi ipotizzando che la loro presenza generasse una parziale emersione dello scafo causata dalla portanza delle ali immerse in acqua. L'emersione conseguente riduce la superficie bagnata degli scafi e l'entità della formazione ondosa permettendo una diminuzione della resistenza complessiva dello scafo. Tale studio è stato pubblicato al congresso dell' AIAS nel 2010.

Uno studio molto importante sugli scafi è stato effettuato per la progettazione della nuova barca costruita nel nostro dipartimento nell'ambito della manifestazione "mille e una vela per l'università" che ci ha visti protagonisti con un'ottima terza posizione nelle regate che si sono tenute nel mese di ottobre del 2010. L'impegno profuso nella progettazione, nel processo di analisi e nel post-processing hanno permesso di scegliere con molta più consapevolezza, rispetto alla scorsa edizione, la forma finale dello scafo.

A questo è seguita la costruzione con metodi e tecnologie avanzate tramite cui siamo riusciti ad ottenere uno scafo resistente, ben avviato, "liscio" e soprattutto leggero.

2. CFD - Computational Fluid Dynamics

2.1 Introduzione

La metodologia CFD, viene largamente utilizzata nel campo dell'industria e della ricerca, per tutte le problematiche che coinvolgono l'azione dei fluidi.

Esistono oggi numerosi software che si occupano di risolvere le equazioni della fluidodinamica; tra questi ricordiamo CFX, KIVA, NUMECA, Phoenix, STAR-CD, STAR-CCM+ ed infine FLUENT, il codice utilizzato per le analisi da me effettuati.

Preliminarmente all'analisi vera e propria vi è la discretizzazione del dominio di calcolo e cioè la suddivisione del volume in cui si trova l'oggetto da analizzare in elementi di superficie o di volume le cui dimensioni decrescono man mano che ci si avvicina alla superficie dell'oggetto. Questa è la fase più delicata che necessita molta cura ed un particolare sforzo per la costruzione di una mesh di alta qualità (senza elementi distorti) e ben progettata rispetto al fenomeno fluidodinamico studiato. Anche in questo caso i programmi che si occupano della costruzione di mesh di domini fluidi sono diversi ma nella fattispecie è stato sempre utilizzato il software ICEM di Ansys.

E' da sottolineare l'importanza del modello CAD nella fase di costruzione della mesh; spesso il modello in nostro possesso si rivela di scarsa qualità presentando "buchi", difetti o semplicemente discontinuità geometriche caratteristiche dell'oggetto, che generano elementi distorti nella mesh. Proprio per questo motivo è spesso necessario correggere tali errori in ambiente CAD per poi importare una nuova geometria "ottimizzata" per la realizzazione della mesh. Il software utilizzato a tale scopo è stato il Rhinoceros.

2.2 Struttura di un codice CFD

Le fasi di un'analisi CFD è sinteticamente composta dai seguenti passi:

- Pre -Processing
- Solving
- Post Processing

2.2.1 Pre-Processing

Si definisce la geometria dell'oggetto che dovrà essere analizzato in un ambiente CAD (Computer Aided Design); questa fase è fondamentale perchè, oltre alla logica considerazione che l'oggetto da analizzare deve essere ben disegnato e aderente nelle forme alla realtà, esso deve garantire l'assenza di "errori" che possano pregiudicare la realizzazione di una buona mesh e quindi la riuscita dell'analisi. Spesso capita, infatti, di avere superfici non correttamente chiuse che lasciano "buchi" o accostamenti con tolleranze troppo elevate che in fase di creazione della mesh causano elementi distorti proprio in quelle zone.

In seguito, devono essere definiti i confini dello spazio virtuale in cui collocare l'oggetto. Tale ambiente virtuale, il cosiddetto "Volume di controllo", deve presentare dei limiti che permettano di approssimare in modo accettabile la realtà. Con ciò si intende la scelta di una quantità di spazio attorno all'oggetto abbastanza grande da poter ipotizzare con sufficiente consapevolezza le condizioni del fluido ai "contorni" di tale spazio.

Lo step successivo prevede la realizzazione di una mesh, cioè di una griglia di calcolo da applicare allo stesso volume di controllo, in modo da poter affrontare il problema in modo discreto. La discretizzazione, è una fase molto delicata, in quanto l'accuratezza della soluzione dipende dal numero di celle della griglia; maggiore è il numero di celle e maggiore risulterà l'accuratezza, così come maggiore sarà l'impiego di risorse hardware. Compito dell'utente è quello di trovare il giusto compromesso tra l'accuratezza dei risultati e l'utilizzo di risorse hardware. In generale si deve tendere ad incrementare il numero delle celle nelle zone in cui ci si aspettano maggiori gradienti, e diminuirlo altrove; è infatti fondamentale che nella mesh non siano presenti infittimenti eccessivi e poco gradualità in zone distanti dall'oggetto analizzato. Questo è particolarmente vero nel caso delle analisi bifase in cui il piano di separazione tra le

fasi è particolarmente sensibile a tali problemi. Una mesh che non abbia questi requisiti non permetterà in alcun modo di effettuare analisi bifase in modalità "steady" cioè non dipendenti dal tempo.

Il software Ansys Icem permette la costruzione di mesh strutturate esaedriche di certo più complesse per realizzazione ma capaci di maggiore accuratezza nella determinazione dei risultati. La discretizzazione del sistema fisico in esame è basata sul concetto di topologia a blocchi, ovvero della suddivisione del dominio in blocchi costituenti una struttura; la possibilità di agire sui singoli blocchi anziché sull'intero dominio facilita la costruzione della mesh (Ansys Icem, 2009).

La discretizzazione del dominio rappresenta certamente la fase più delicata nell'impostazione di una analisi di fluidodinamica numerica tant'è che, in generale, la maggior parte del tempo necessario alla messa a punto di una simulazione CFD è spesa proprio in questa fase.

Segue l'assegnazione delle condizioni al contorno, operazione che può essere effettuata sia tramite il software di discretizzazione che tramite quello di analisi; anche in questo caso l'attenzione e la ricerca delle corrette impostazioni è un problema che richiede molto tempo e svariati tentativi per giungere a risultati ottimali. Un'impostazione di "outflow" può facilmente causare un errore di "reversed flow" durante l'analisi così come una di "wall-no slip" piuttosto che "wall-slip" può rendere l'analisi divergente a causa di turbolenze proprio su quelle superfici su cui abbiamo settato quella condizione.

2.2.2 Solving (*Processing*)

E' la fase in cui il codice di calcolo effettua l'analisi. I tempi di calcolo sono funzione di molte cose: essi variano a seconda che l'analisi sia stazionaria o non stazionaria, che sia monofase o multifase, a seconda del modello di turbolenza scelto e degli schemi di discretizzazione delle equazioni piuttosto che dall'impostazione degli under-relaxation factors. Ovviamente essi sono strettamente dipendenti dai criteri di convergenza scelti e (nel caso di analisi un-steady) dal numero di time-steps richiesti.

E' importante sottolineare che tutte queste considerazioni sono in ogni caso strettamente dipendenti dalla qualità della mesh nel senso che qualunque impostazione scelta potrà essere inefficace e non consentire la convergenza della soluzione qualora la mesh abbia "difetti" che non consentano la soluzione delle equazioni che governano il fenomeno fluidodinamico studiato; proprio per questo motivo appare evidente che i tempi per il raggiungimento della

convergenza di una soluzione siano, in prima approssimazione strettamente legati alla qualità della mesh (Ansys Fluent, 2006).

2.2.3 Post-processing

La terza ed ultima fase, è quella del post-processing. In questa fase i risultati della simulazione possono essere visualizzati ed analizzati in diversi modi; oltre alla possibilità di visionare i valori numerici che più ci interessano, la maniera più diretta ed intuitiva per l'analisi dei risultati è fornita dalle rappresentazioni grafiche delle grandezze fluidodinamiche quali, ad esempio, velocità e pressione. Attraverso l'uso di scale cromatiche, l'interpretazione risulta chiara e immediata, permettendo di capire con facilità come si comporta un certo oggetto che in moto perturba lo strato di fluido circostante.

2.3 Modelli di Turbolenza

E' fondamentale nella tecnica CFD, la scelta e l'utilizzo di un modello di turbolenza tra i vari messi a disposizione dal solutore; tale scelta è strettamente legato al problema che stiamo affrontando.

Sebbene sia possibile risolvere direttamente le equazioni di Navier-Stokes nel caso di flussi laminari, a causa dell'elevato costo computazionale che esse richiedono, è necessario ricorrere all'utilizzo di un modello di turbolenza per lo studio dello strato limite.

Una delle ipotesi di base dalla quale è possibile partire, in un processo di modellazione della turbolenza, consiste nell'assumere che le tensioni di Reynolds possano essere relazionate al flusso medio per mezzo di una viscosità apparente (viscosità turbolenta) e del gradiente del flusso medio locale, in modo analogo alle tensioni viscosi dei fluidi newtoniani. L'ipotesi basata sulla viscosità turbolenta fu originariamente proposta da Boussinesq il quale introdusse, per le tensioni di Reynolds, la seguente espressione :

$$-\overline{u'_i u'_j} = \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} K$$

dove ν_t rappresenta appunto la viscosità turbolenta, δ_{ij} è il delta di Kronecker e K l'energia cinetica turbolenta.

Il concetto di viscosità turbolenta è oggi ampiamente impiegato e su di esso si fondano molti modelli di turbolenza; i più importanti e diffusi sono:

- Inviscid;
- Laminar;
- Spalart – Allmaras;
- $k - \epsilon$;
- $k - \omega$;
- Reynolds Stress.

Nei paragrafi seguenti si analizzeranno i modelli utilizzati nelle analisi effettuate.

2.3.1 Modello di turbolenza $K - \epsilon$

Il $K - \epsilon$ è un esempio di modello di turbolenza a 2-equazioni, basato, cioè, sull'utilizzo di due equazioni di trasporto: la prima per l'energia cinetica turbolenta K , la seconda per la ϵ , ovvero la dissipazione di energia cinetica turbolenta.

Il modello $K - \epsilon$ è ampiamente utilizzato nelle simulazioni numeriche CFD poiché si dimostra molto flessibile, nonostante palesi una forte limitazione nel trattamento dei flussi fluidi prossimi ad una parete. Tale limite, in generale, viene risolto ricorrendo all'applicazione di funzioni aggiuntive descriventi il profilo delle velocità medie vicino ad una superficie, sebbene continui a manifestarsi una certa debolezza nel caso di simulazioni di flussi, prossimi ad una parete, caratterizzati da forti gradienti di pressione.

2.3.2 Modello di turbolenza $K - \omega$

Il modello $K - \omega$ (Wilcox, D.C., 1998), introdotto specificatamente per la risoluzione di problemi in campo nautico–navale, costituisce una evoluzione del $K - \epsilon$ in quanto riesce a risolvere efficacemente il problema del trattamento del fluido alla parete senza ricorrere ad equazioni aggiuntive.

Analogamente al $K - \epsilon$, questo modello si basa su due equazioni di trasporto: la prima relativa, come sempre, all'energia cinetica turbolenta K , la seconda relativa al parametro di dissipazione ω proporzionale al rapporto ϵ/K ed interpretabile come una frequenza di turbolenza.

Questo modello è oggi molto apprezzato per l'accettabile livello di accuratezza che riesce a garantire, sebbene la sua applicazione sia resa alquanto difficoltosa e complessa, a causa della forte sensibilità del modello alla qualità della discretizzazione del sistema fisico in esame.

3. Ottimizzazione della center-line di un'autovettura da turismo

3.1 Introduzione

La resistenza di forma è quella aliquota della resistenza fluidodinamica totale dovuta alla separazione delle linee di flusso a causa dalla penetrazione di un corpo materiale in un fluido. Si noti quindi (figura 3.1) come il percorso delle linee di flusso è determinato dalla forma del corpo che le attraversa. La perturbazione dello stato inerziale delle linee di flusso provoca delle differenze di pressione attorno alla geometria del corpo solido; tali differenze di pressione si traducono in una forza di resistenza. Questo tipo di resistenza è predominante nei corpi cosiddetti tozzi, e cioè quelli, che lasciano una scia turbolenta.

Scopo di questo lavoro è quello di valutare e successivamente migliorare il coefficiente di penetrazione aerodinamica di un'automobile, oggetto caratterizzato per sua natura geometrica da una forma tozza (figura 3.2).

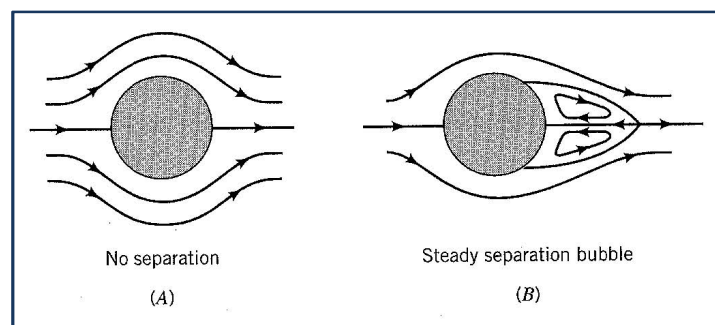


Figura 3.1 Esempio di corpo tozzo con separazione di scia.

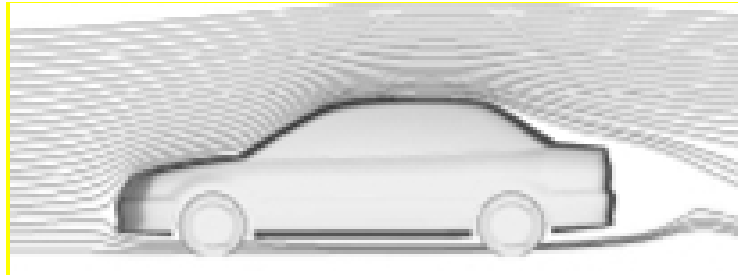


Figura 3.2 Corrente fluida attorno ad una vettura a tre volumi.

3.2 Aerodinamica di un'automobile

Come è ovvio aspettarsi, il comportamento fluidodinamico di un'automobile è strettamente legato alla sua forma (Katz J., 1998); di per se un'automobile ha una forma tozza ed è per questo soggetta in maniera considerevole alla resistenza di forma; per questo motivo un'attenta valutazione delle sue caratteristiche geometriche risulta particolarmente importante al fine di migliorarne le caratteristiche aerodinamiche.

Lo studio è partito dalla valutazione dei parametri geometrici che definiscono la parte anteriore di un'automobile; essi sono:

- raggi di raccordo dei bordi;
- inclinazione del cofano anteriore;
- inclinazione della parte frontale.

Un aumento del raggio di raccordo, produce una rapida diminuzione del coefficiente di resistenza, ma superando un certo valore, la forza di drag si mantiene costante (condizione di saturazione); lo stesso avviene per il cofano la cui inclinazione produce, fino ad un certo angolo, un miglioramento delle sue prestazioni aerodinamiche.

Il terzo parametro da esaminare è l'angolo di inclinazione della faccia frontale; alcuni studi hanno permesso di individuare un punto di ristagno ottimo (figura 3.3), la cui posizione dipende dalla forma del veicolo completo e dalla forma della parte anteriore. Generalmente si è visto che un basso punto di ristagno favorisce una bassa resistenza.

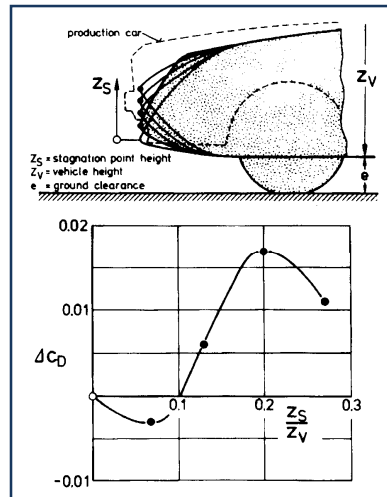


Figura 3.3 Effetto della posizione del punto di ristagno sulla resistenza.

Inoltre la posizione del punto di ristagno determina la porzione d'aria che passa sopra il veicolo e quella che scorre tra il fondo e il terreno.

Molto importante risulta essere anche l'inclinazione del parabrezza; dalla figura 3.4 si può vedere come il punto di separazione S sia spostato verso la parte anteriore e il punto di riattacco R verso il retro quanto più l'angolo γ del parabrezza aumenta.

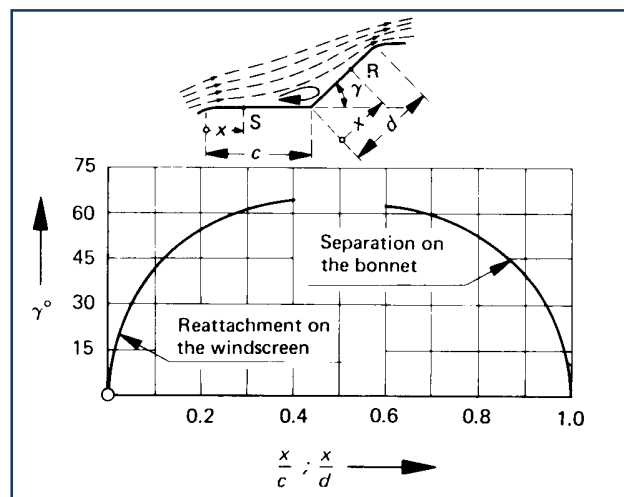


Figura 3.4 Separazione della corrente sul cofano e riattacco sul parabrezza in funzione di γ .

Angoli d'inclinazione del parabrezza maggiori di 60° non sono praticabili a causa della diffusione della luce; inoltre parabrezza grandi e fortemente inclinati portano ad un aumento del riscaldamento dell'abitacolo dovuto all'irraggiamento.

Nella parte posteriore dell'autoveicolo gli strati limite si separano e danno origine a scie turbolente con diffuse zone di vorticosità; tali vorticosità (figura 3.5) svolgono una continua azione di trascinamento del fluido con la conseguente riduzione di pressione in coda, associata alla differenza di pressione tra le regioni anteriori e posteriori, tipica dei corpi con coda tronca, indicata come resistenza di base.

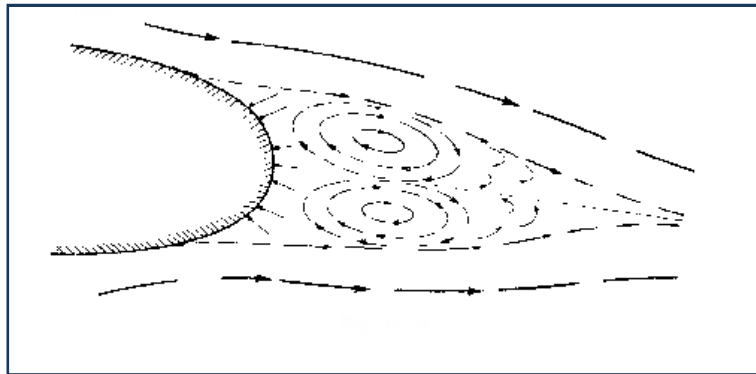


Figura 3.5 Campo di moto nella parte posteriore di un corpo.

Un modo molto diffuso per migliorare il comportamento aerodinamico della parte posteriore di un'automobile è quello di affusolare il retrotreno della vettura stando attenti a non limitare eccessivamente lo spazio interno.

Un altro parametro di cui tenere conto quando si realizza il progetto di un autoveicolo, è l'angolo di inclinazione del tetto. Un suo abbassamento, migliora il coefficiente aerodinamico, ma riduce il volume interno della zona posteriore in cui prendono posto i passeggeri.

3.3 Fiat Bravo 2007

Il modello da sottoporre ad analisi è la Fiat Bravo 2007 (figura 3.6 e 3.7), veicolo caratterizzato da un C_x (coefficiente di penetrazione aerodinamica) pari a 0.31.



Figura 3.6 Fiat Bravo.

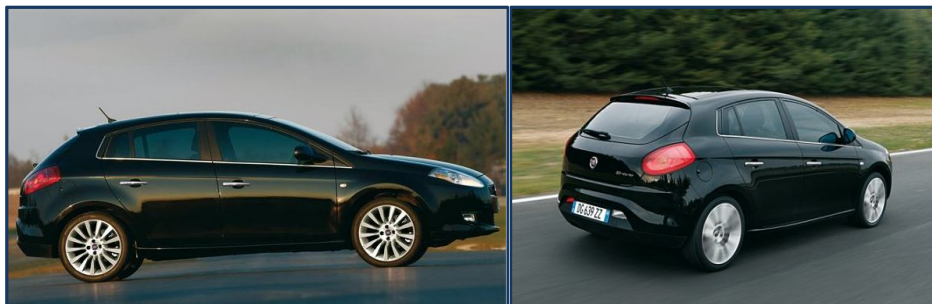


Figura 3.7 Fiat Bravo: vista laterale e posteriore

3.3.1 Pre-Processing

La prima fase del lavoro consiste nella ricostruzione tramite il CAD Rhinoceros della center-line del veicolo; essa è possibile importando un file immagine come sfondo (figura 3.8), per poterlo utilizzare come riferimento per il tracciamento delle linee della vettura (figura 3.9).

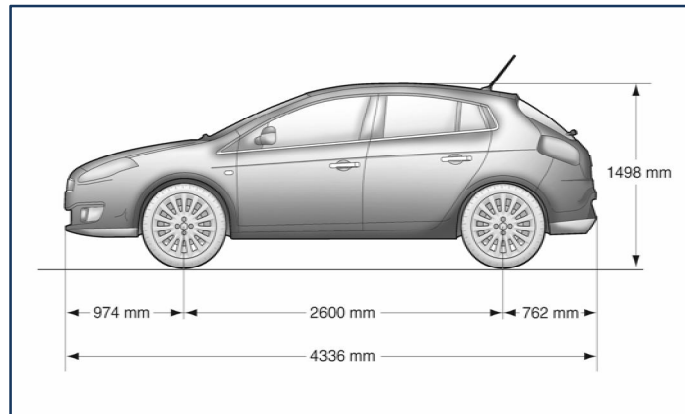


Figura 3.8 Immagine di sfondo per il tracciamento della center-line dell'autovettura.

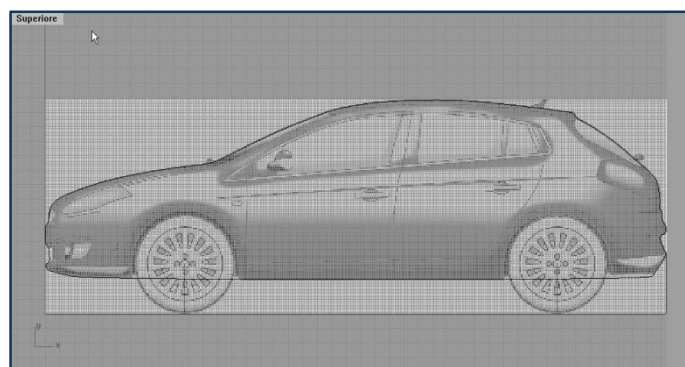


Figura 3.9 Posizionamento dell'immagine di sfondo nella finestra di lavoro di Rhinoceros.

Si procede quindi alla realizzazione delle curve per punti di controllo, cioè di curve passanti per i punti selezionati nello spazio, come mostrato in figura 3.10.



Figura 3.10 Spline e punti di controllo.

Una volta realizzate le curve si procede ad un controllo di curvatura delle stesse e alla verifica che esse formino un contorno chiuso.

Il file creato, in formato .3dm, viene poi esportato in formato IGES, in modo da poter essere importato dal software Ansys ICEM.

Dopo aver importato la geometria in formato IGES viene costruito il volume di controllo lungo 65 metri e alto 12 (figura 3.11). Sono state adottate tali dimensioni in quanto, in ingresso la corrente deve risultare indisturbata e non influenzata dalla presenza del veicolo, mentre l'uscita deve essere abbastanza lontana da permettere lo sviluppo della scia turbolenta lasciata dallo stesso.

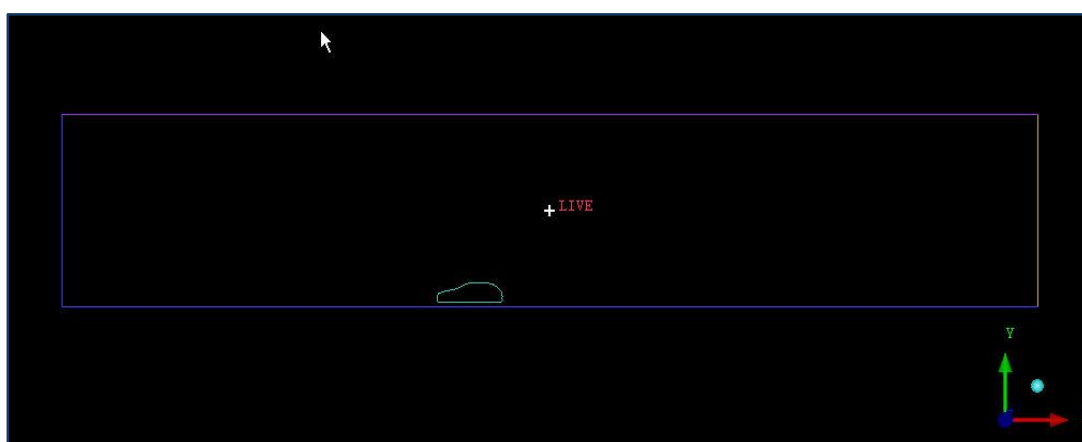


Figura 3.11 Creazione del volume di controllo.

Successivamente si procede alla suddivisione del volume di controllo in blocchi come mostrato nelle figure 3.12 e 3.13.

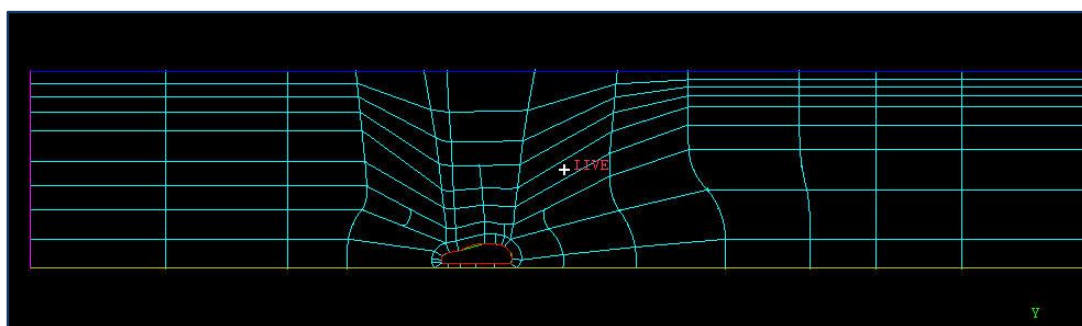


Figura 3.12 Schema di suddivisione in blocchi.

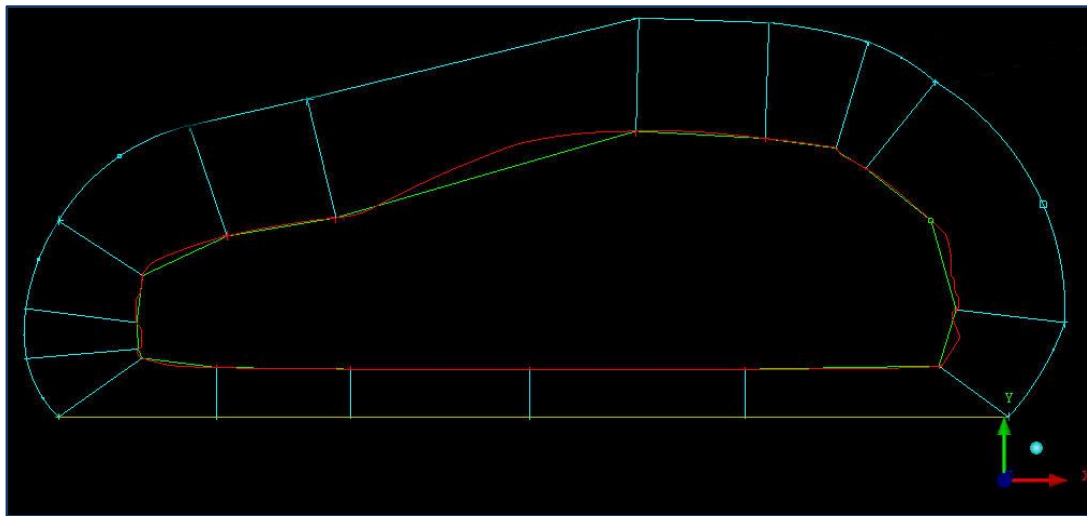


Figura 3.13 Particolare del sistema a blocchi attorno all'autovettura.

Particolare attenzione è stata riposta nella costruzione della mesh in prossimità della parte anteriore del veicolo che, a causa della sua curvatura, genera forti gradienti di pressione e velocità del fluido. Le stesse considerazioni valgono per la parte posteriore del veicolo interessata dalla separazione della vena fluida e dalla scia turbolenta causata dalla coda tronca (figure 3.14 e 3.15).

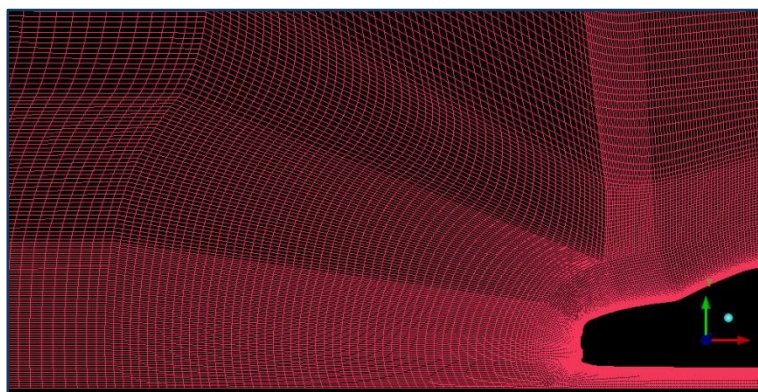


Figura 3.14 Dettaglio della mesh nella zona anteriore.

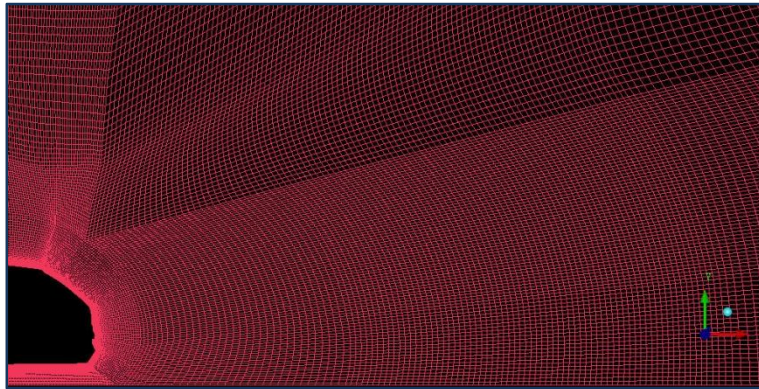


Figura 3.15 Dettaglio della mesh nella zona posteriore.

3.3.2 Solving

Per l'analisi fluidodinamica, effettuate con il software Ansys Fluent 6.3.26 nella versione 2ddp sono state adottate le seguenti impostazioni (Manan Desai, Channiwala S.A., Nagarsheth H.J., 2008).

Come modello di turbolenza, è stato scelto il k- ϵ (adatto a flussi con alti numeri di Reynolds) nella sua formulazione standard.

Nel nostro caso, inoltre, è utile valutare in maniera più possibile approfondita le caratteristiche della corrente fluida nello strato limite: per questo motivo è necessario utilizzare l'Enhanced Wall Treatment che richiede che la mesh sia fine abbastanza da risolvere il sottostrato laminare.

Le condizioni al contorno, mostrate nella figura 3.16, sono:

- In: Velocity Inlet;
- Out: Outflow;
- Top e Bottom: Symmetry;
- Autovettura: Wall.

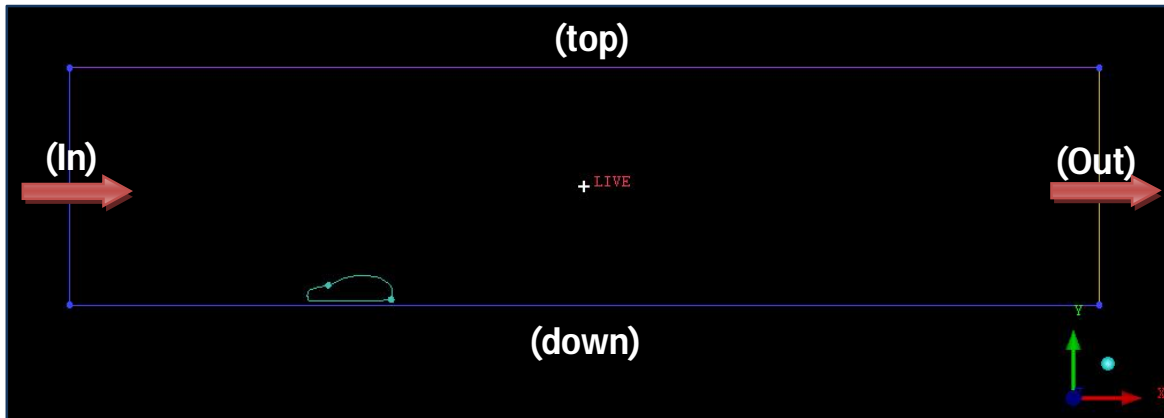


Figura 3.16 Boundary conditions.

Come algoritmo di accoppiamento pressione-velocità è stato scelto il SIMPLEC. Il SIMPLE è la condizione di default, ma in molti problemi in cui la convergenza è limitata dal solo accoppiamento pressione-velocità, come quello in oggetto, è possibile scegliere il modello SIMPLEC che consente di raggiungere la convergenza della soluzione in un tempo minore.

Per quanto riguarda gli under-relaxation factors si è preferito utilizzare valori più bassi in considerazione del fatto che elevati valori di pressione producono problemi di instabilità e quindi di convergenza.

Gli schemi di discretizzazione delle equazioni sono stati mantenuti sui settaggi di default e cioè al primo ordine.

La velocità alla quale sono state condotte le analisi è di 37 m/s; i risultati ottenuti sono i seguenti:

$$C_x=0,34033$$

$$C_l=0,10165$$

3.3.3 Post-Processing

Nelle figure sottostanti vengono rappresentate le distribuzioni della pressione statica (figura 3.17), della pressione dinamica (figura 3.18), della componente della velocità in direzione orizzontale (figura 3.19) ed i vettori della velocità (figura 3.20, 3.21, 3.22 e 3.23).

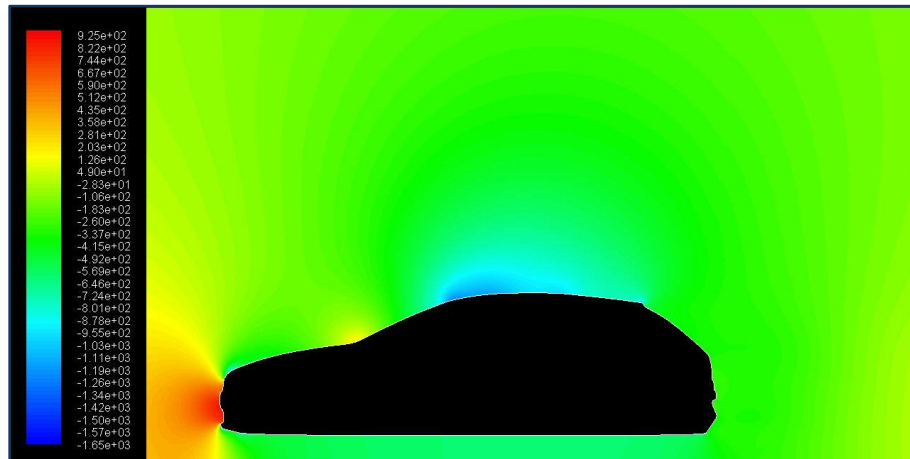


Figura 3.17 Contour della pressione statica.

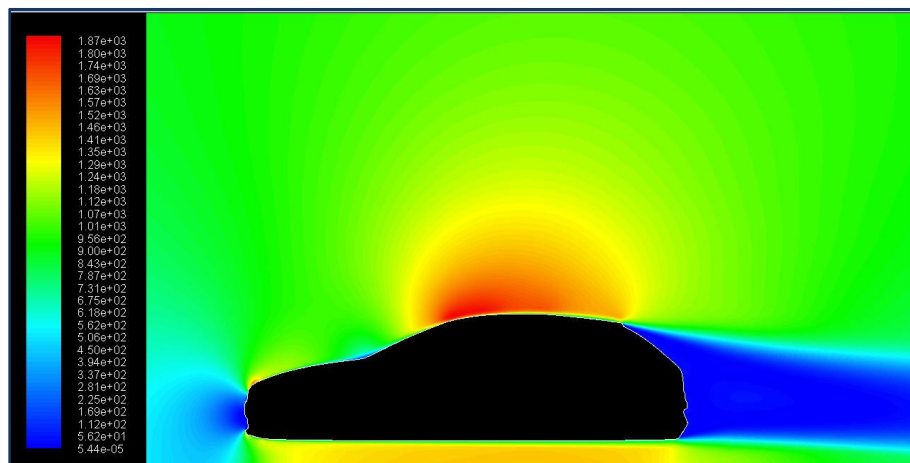


Figura 3.18 Contour della pressione dinamica.

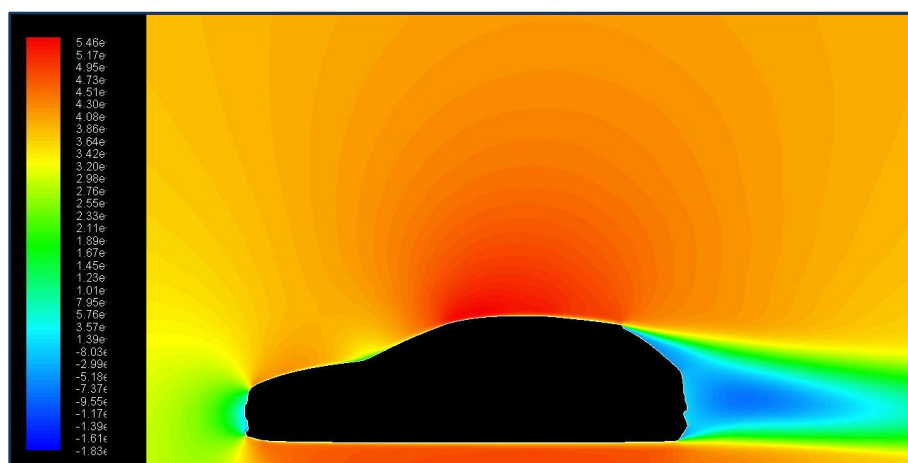


Figura 3.19 Contour della velocità in direzione orizzontale.

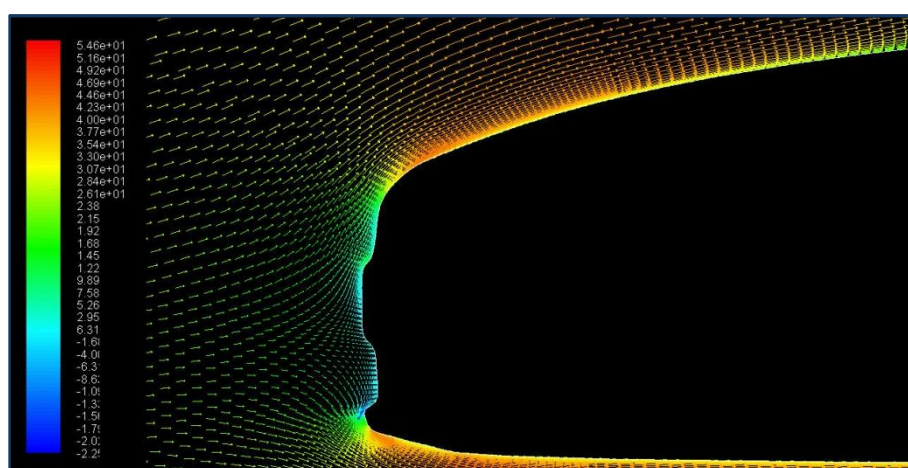


Figura 3.20 Vettori velocità: particolare parte anteriore.

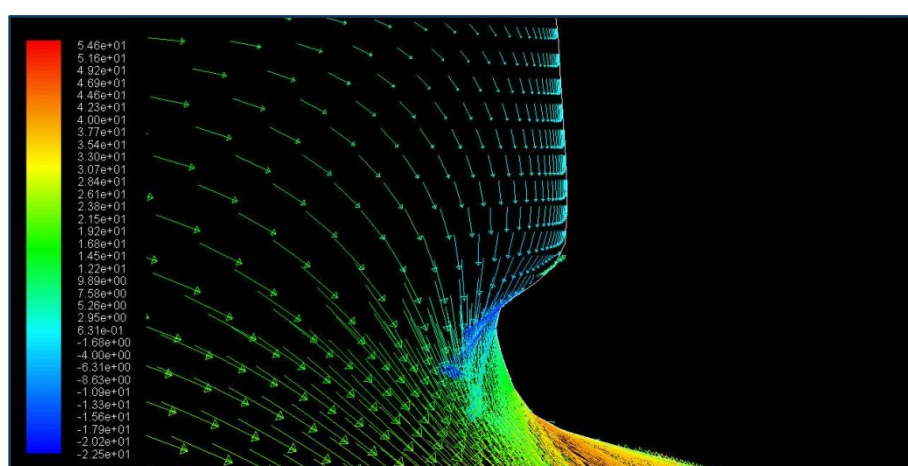


Figura 3.21 Vettori velocità: particolare parafango.

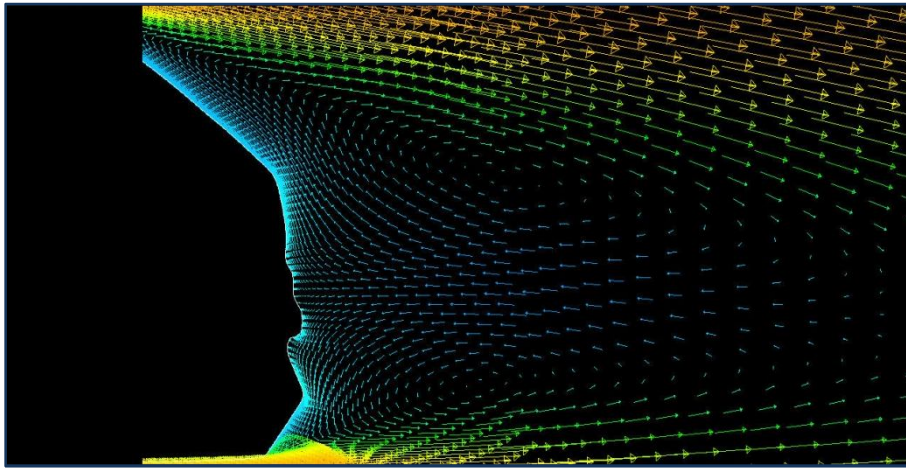


Figura 3.22 Vettori velocità: particolare parte posteriore.

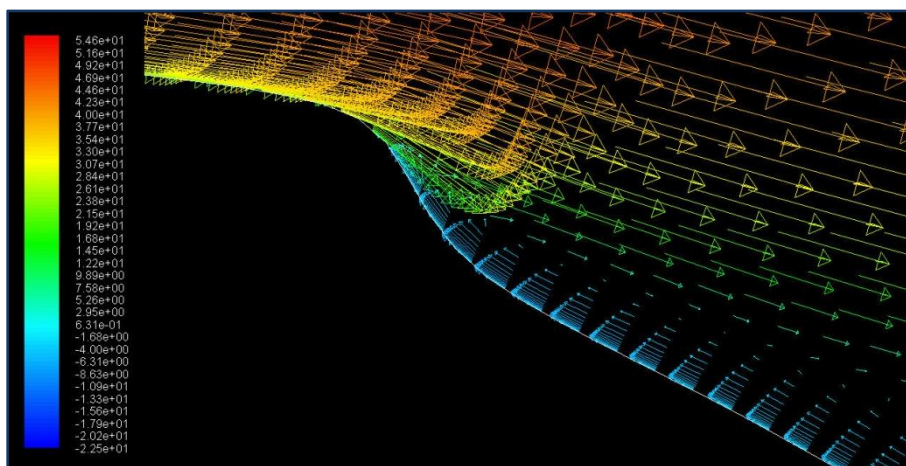


Figura 3.23 Vettori velocità: particolare spoiler.

Nelle tabelle 3.1 e 3.2 sono mostrati i valori delle forze (espresse in Newton) e i relativi coefficienti computati tramite le analisi CFD:

Tabella 3.1 Forze e coefficienti in direzione x.

Pressure	Viscous	Total	Pressure	Viscous	Total
Force	Force	Force	Coefficient	Coefficient	Coefficient
602.188	49.311	651.499	0.314	0.025	0.340

Tabella 3.2 Forze e coefficienti in direzione y.

Pressure Force	Viscous Force	Total Force	Pressure Coefficient	Viscous Coefficient	Total Coefficient
189.508	5.093	194.601	0.098	0.002	0.101

3.3.4 Metodo di White

I risultati ottenuti mediante analisi CFD vengono comparati con quelli determinati analiticamente mediante il metodo di White; esso è un metodo empirico che consente di valutare il C_x di un qualunque veicolo tramite il procedimento spiegato di seguito.

Il veicolo viene suddiviso in nove parti ad ognuna delle quali si assegna un determinato peso x_i (ricavato da una opportuna tabella) introdotto successivamente nella espressione empirica di seguito esposta:

$$C_D = a_0 + \sum_{i=1}^9 x_i a_i = 0,16 + 0,0095 \sum_{i=1}^9 x_i$$

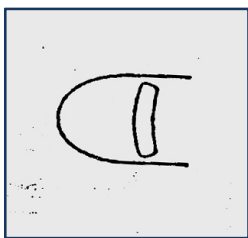
dove i coefficienti a_i e a_0 vengono ricavati mediante un'analisi statistica effettuata in galleria del vento. Le 9 parti in cui il veicolo viene suddiviso sono le seguenti:

- **Parte anteriore:**
 - 1. Contorno in pianta; 2. Profilo;
- **Intersezione parabrezza abitacolo:**
 - 3. Sezione trasversale; 4. Pianta parabrezza;
- **Abitacolo:**
 - 5. Intersezione parabrezza – tetto; 6. Pianta;
- **Coda e fondo:**
 - 7. Parte posteriore abitacolo – coda; 8. Pianta posteriore; 9. Fondo (Parte inferiore).

I pesi ricavati per il caso della Fiat Bravo sono:

1. Contorno in pianta

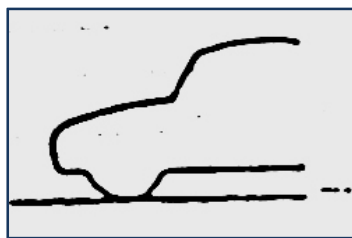
PIANTA CIRCA SEMICIRCOLARE: $x=1$



2. Profilo

MUSO MEDIAMENTE ALTO

ARROTONDATO: $x=3$

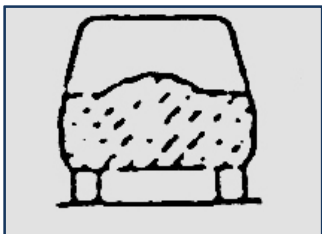


+4 per parafranghi separati +2 per fari semi-annegati

3. Sezione Trasversale

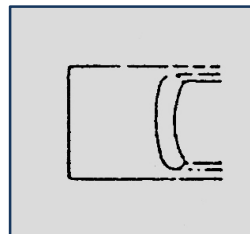
COFANO ALTO CON PARAFANGHI

RACCORDATI IN ALTO: $x=3$



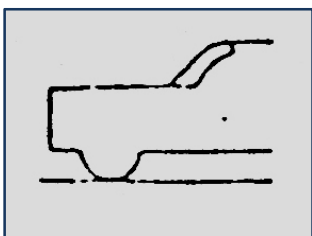
4. Pianta Parabrezza

PIANTA CONVESSA: $x=3$



5. Intersezione parabrezza-tetto

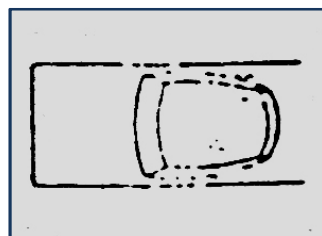
ARROTONDATA: $x=1$



6. Pianta

BENE O MEDIAMENTE RASTREMATA

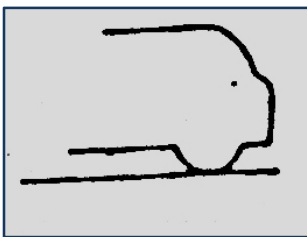
VERSO LA PARTE POSTERIORE: $x=1$



7. Parte posteriore abitacolo-coda

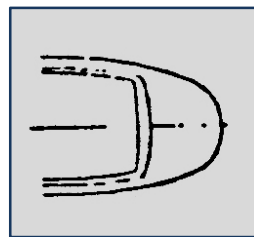
ABITACOLO ARROTONDATO CON COFANO

POSTERIORE PICCOLO O ASSENTE: $x=5$



8. Pianta posteriore

BENE O MEDIAMENTE RASTREMATA: $x=1$



9. Fondo (parte inferiore)

COMPLETAMENTE LISCIO O CON PICCOLE

SPORGENZE MECCANICHE: $x=1$

Dalla somma dei vari pesi si ricava:

$$\sum_{i=1}^9 x_i = 1 + 3 + 3 + 2 + 3 + 3 + 1 + 1 + 5 + 1 + 1 = 24$$

da cui:

$$C_D = 0,16 + 0,0095 \sum_{i=1}^9 x_i = 0,388$$

3.3.5 Risultati

Per maggiore chiarezza, si ripetono di seguito i risultati ottenuti con i due metodi:

- analisi CFD:

$$C_x = 0.340$$

$$C_l = 0.101$$

- metodo empirico di White:

$$C_x = 0.388$$

I dati ricavati sperimentalmente in galleria del vento, e forniti gentilmente dalla Fiat, sono i seguenti:

$$C_x = 0.305 \div 0.325$$

$$C_l = 0.12 \div 0.15$$

I valori oscillano all'interno di un determinato range a seconda della motorizzazione e dell'allestimento del modello scelto.

Come si può notare, i risultati ottenuti mediante le analisi CFD, seppur effettuate in 2D sul profilo della center-line, si accostano maggiormente ai dati dichiarati dal costruttore rispetto al metodo di White.

3.3.5 Modifiche della geometria della Fiat Bravo 2007

Come già detto precedentemente, scopo principale di questo lavoro è quello di apportare opportune modifiche alla geometria del veicolo al fine di ridurre il suo coefficiente di penetrazione aerodinamica.

Per evitare di stravolgerne la forma, e volendo agire su quelle parti del veicolo facilmente sostituibili, si è deciso di porre l'attenzione su due componenti fondamentali della Bravo: il primo è il paraurti anteriore su cui si può intervenire eliminando quelle zone in cui il fluido ha velocità quasi nulla e tende a stagnare. Successivamente si effettua un attento studio sugli spoiler posteriori, da posizionare al di sopra del lunotto, il cui compito è di fornire minore resistenza aerodinamica e un migliore effetto deportante rispetto al modello originale.

E' stata effettuata una modifica al profilo della parte alta del paraurti ridisegnando la geometria con un angolo di inclinazione di 14.24° rispetto all'orizzontale, anziché i 13.30° del modello originale (figura 3.24):

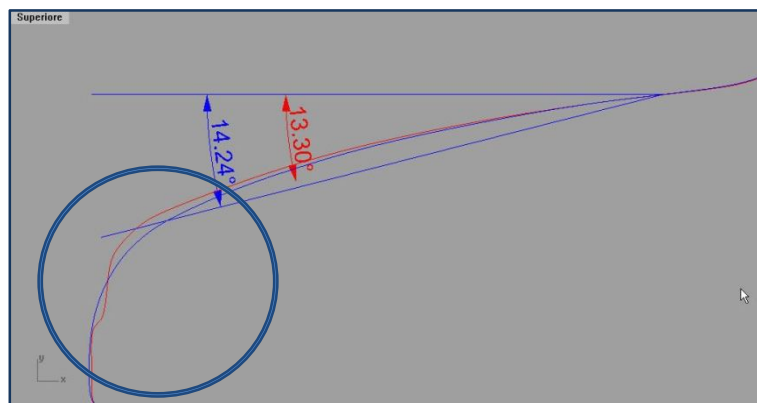


Figura 3.24 Modifica parte alta paraurti anteriore: in rosso il modello originale, in blu il modello modificato.

Come è possibile vedere, è stata apportata un'ulteriore modifica al profilo colorato in blu, indicata dal cerchio in figura 3.24 o visibile meglio nella figura 3.25.



Figura 3.25 Modifica parte alta paraurti anteriore.

A seguito delle modifiche apportate alla parte anteriore della vettura si sono calcolati, mediante analisi CFD, i seguenti valori dei coefficienti di resistenza e portanza:

$$C_x=0.334$$

$$C_l=0.130$$

Dalla comparazione dei risultati ottenuti si evince una riduzione dell'1,65% per il primo coefficiente ed un aumento del 22% per il secondo.

La seconda modifica apportata alla parte anteriore del veicolo ha riguardato il "naso" dello stesso; il risultato di tale operazione è visibile nella figura 3.26.

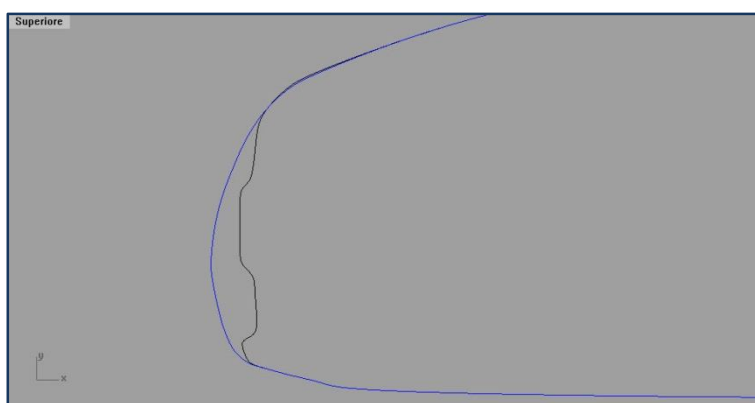


Figura 3.26 Modifica del "naso" del veicolo: in blu il modello modificato.

I valori dei coefficienti ottenuti in questo caso sono:

$$C_x=0.331$$

$$C_l=0.097$$

Poniamo adesso l'attenzione su altri due aspetti fondamentali nel campo dell'aerodinamica degli autoveicoli: l'angolo di inclinazione del "front-end" e la posizione del punto di ristagno (figura 3.27 e 3.28).



Figura 3.27 Rappresentazione dell'angolo di Inclinazione del front-end.

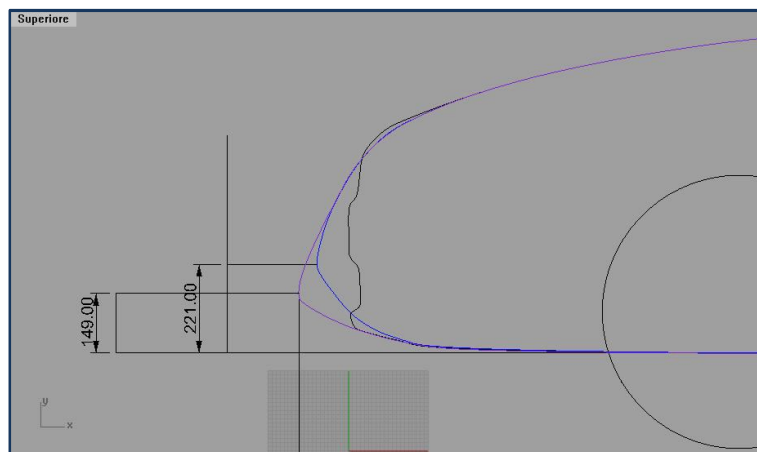


Figura 3.28 Posizione verticale del punto di ristagno.

Le variazioni effettuate hanno portato alla realizzazione di un profilo quasi a punta, con la stessa rivolta verso il basso; le configurazioni ipotizzate sono mostrate nella figura 3.28.

I risultati delle analisi CFD su tali configurazioni mostrano come un abbassamento del punto di ristagno produca una riduzione della forza resistente.

- configurazione A: altezza punto di ristagno di 221 mm:

$$C_x=0.328$$

$$C_l=0.129$$

- configurazione B: altezza punto di ristagno di 149 mm:

$$C_x=0.328$$

$$C_l=0.060$$

La scelta ovviamente ricade sulla seconda opzione, le cui analisi fluidodinamiche mostrano (figura 3.29) come nel front-end, la zona a bassa velocità, abbia ridotto la sua estensione e come l'aria riesca a fluire meglio e a non ristagnare.

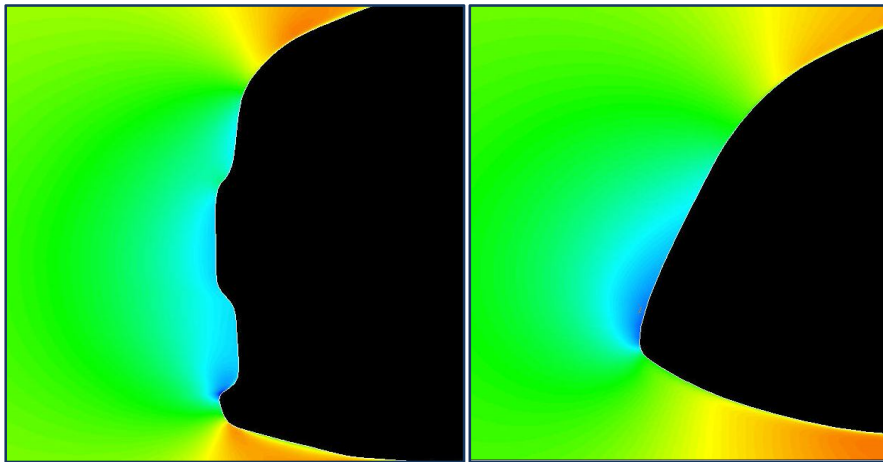


Figura 3.29 Confronto modello originale - modello configurazione B.

Nelle tabelle 3.3 e 3.4, si riportano le forze di pressione e le forze viscose (esprese in Newton) agenti sulla superficie del veicolo, e i loro rispettivi coefficienti, sia nella direzione del moto (asse delle ascisse x) che nella direzione normale ad esso (asse delle ordinate y).

Tabella 3.3 Forze e coefficienti in direzione x.

Pressure Force	Viscous Force	Total Force	Pressure Coefficient	Viscous Coefficient	Total Coefficient
574.808	54.347	629.155	0.300	0.028	0.328

Tabella 3.4 Forze e coefficienti in direzione y.

Pressure Force	Viscous Force	Total Force	Pressure Coefficient	Viscous Coefficient	Total Coefficient
110.514	5.467	115.981	0.057	0.002	0.060

Si vuole adesso analizzare l'influenza che uno spoiler posteriore, posto al di sopra del lunotto, produrrebbe sulla resistenza e sulla deportanza dell'automobile.

Non tenendo conto di limiti imposti da scelte stilistiche effettuate dalla Fiat, cerchiamo di determinare la configurazione dello spoiler che consenta di ottenere la coppia di coefficienti C_x e C_y che ottimizzi al meglio le prestazioni.

Le analisi sono state condotte variando due parametri:

- lunghezza del profilo alare;
- angolo di Incidenza rispetto all'orizzontale.

Le lunghezze prese in considerazione sono: 25, 50, 75, 100 e 150 mm. Gli angoli scelti, variano da -30° a 35° , con step di 5 gradi.

I profili realizzati sono in tutto 70; di questi, per semplicità, presentiamo a scopo esplicativo quelli relativi a tre angoli: 0° , -20° , 20°

I disegni sono visibili nelle figure 3.30, 3.31 e 3.32.

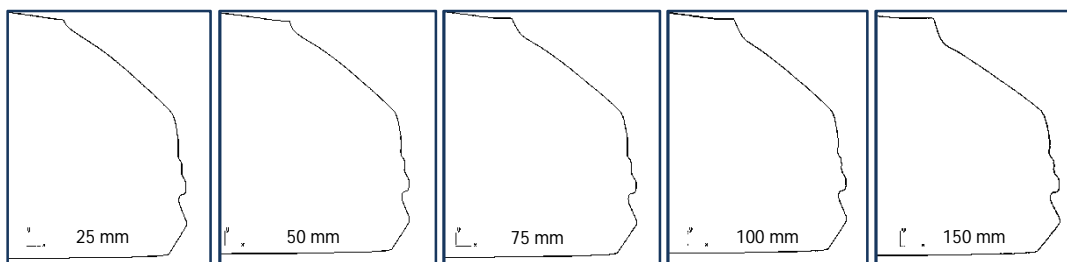


Figura 3.30 Configurazione spoiler: 0° gradi.

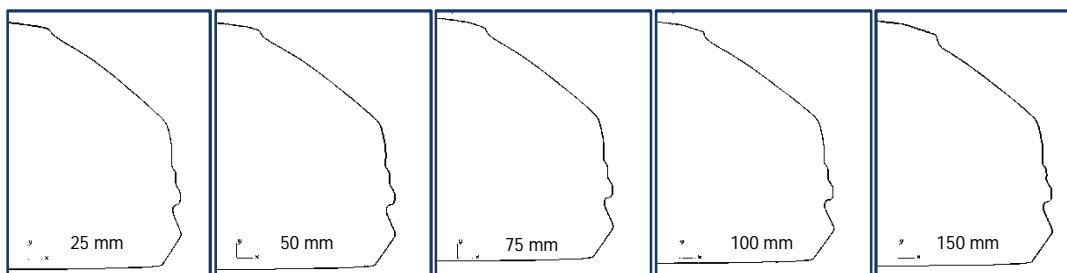


Figura 3.31 Configurazione spoiler: -20° gradi.

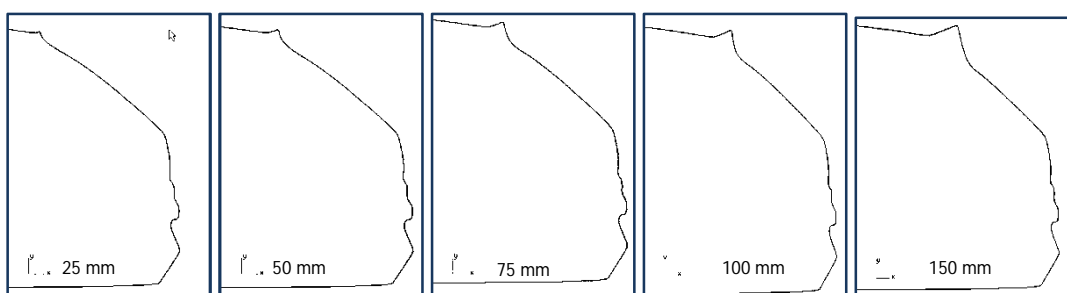


Figura 3.32 Configurazione Spoiler: 20°gradi.

Nelle tabelle 3.5 e 3.6 possiamo leggere i valori di C_x e C_l ricavati dalle analisi effettuate sulle geometrie realizzate.

Tabella 3.5 Valori di C_x .

Angolo (gradi)	Lunghezza spoiler (mm)				
	25	50	75	100	150
35	0,473	0,523	0,557	0,591	0,633
30	0,459	0,510	0,545	0,573	0,599
25	0,457	0,494	0,521	0,545	0,568
20	0,446	0,477	0,498	0,516	0,536
15	0,437	0,460	0,466	0,500	0,501
10	0,432	0,43	0,440	0,457	0,487
5	0,406	0,411	0,427	0,436	0,445
0	0,394	0,396	0,414	0,417	0,417

-5	0,378	0,376	0,393	0,394	0,389
-10	0,373	0,362	0,369	0,362	0,362
-15	0,368	0,355	0,346	0,342	0,344
-20	0,342	0,342	0,327	0,336	0,315
-25	0,342	0,328	0,313	0,317	0,303
-30	0,338	0,316	0,316	0,304	0,283

Tabella 3.6 Valori di Cl.

Angolo (gradi)	Lunghezza spoiler (mm)				
	25	50	75	100	150
35	-0,930	-1,254	-1,458	-1,649	-1,868
30	-0,842	-1,174	-1,391	-1,550	-1,700
25	-0,829	-1,079	-1,251	-1,396	-1,533
20	-0,756	-0,974	-1,109	-1,227	-1,356
15	-0,693	-0,848	-0,892	-1,121	-1,135
10	-0,653	-0,690	-0,705	-0,830	-1,059
5	-0,453	-0,492	-0,617	-0,689	-0,761
0	-0,365	-0,372	-0,529	-0,554	-0,559
-5	-0,237	-0,214	-0,362	-0,370	-0,338
-10	-0,193	-0,102	-0,158	-0,099	-0,104
-15	-0,153	-0,043	0,042	0,076	0,051
-20	0,079	0,073	0,217	0,129	0,335
-25	0,078	0,213	0,359	0,313	0,455
-30	0,115	0,331	0,323	0,452	0,671

Nelle figure seguenti (figura 3.33, 3.34, 3.35, 3.36 e 3.37) possiamo vedere i diagrammi che mostrano le variazioni dei coefficienti in funzione dell'angolo, per ogni lunghezza del profilo.

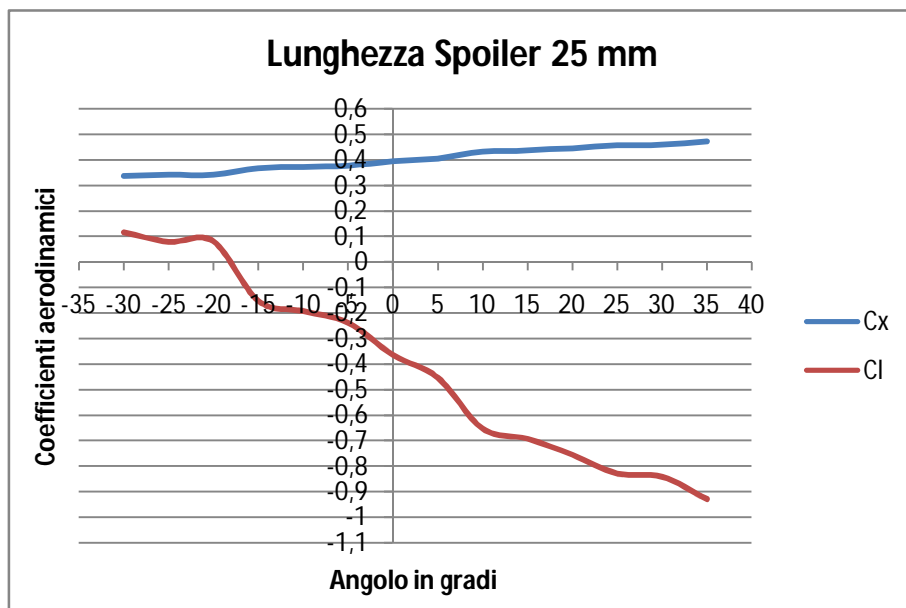


Figura 3.33 Andamento coefficienti aerodinamici in funzione dell'angolo: 25 mm.

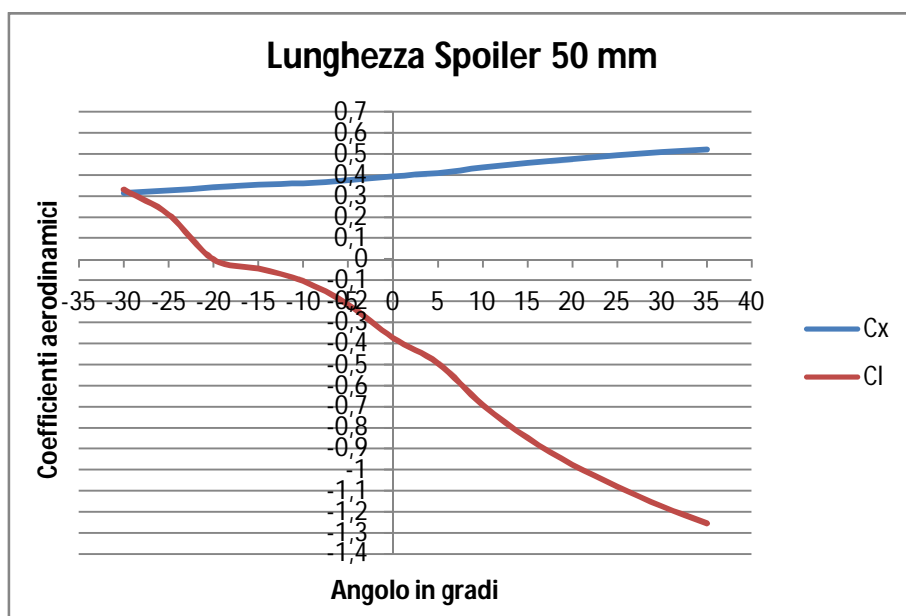


Figura 3.34 Andamento coefficienti aerodinamici in funzione dell'angolo: 50 mm.

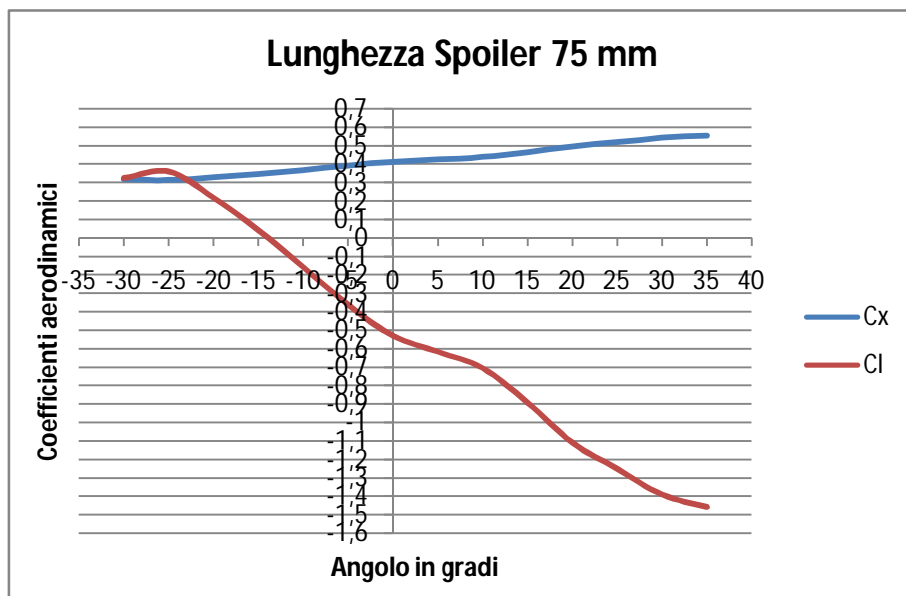


Figura 3.35 Andamento coefficienti aerodinamici in funzione dell'angolo: 75 mm.

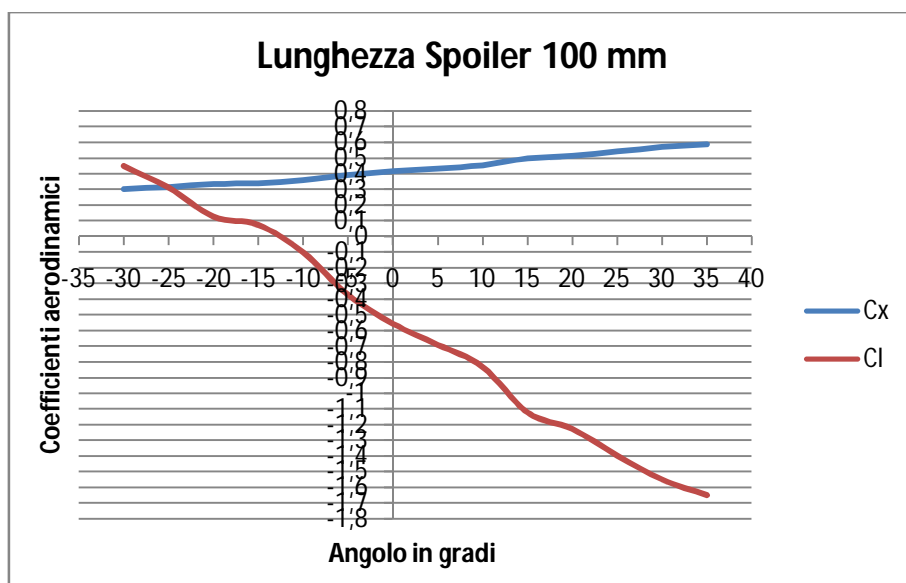


Figura 3.36 Andamento coefficienti aerodinamici in funzione dell'angolo: 100 mm.

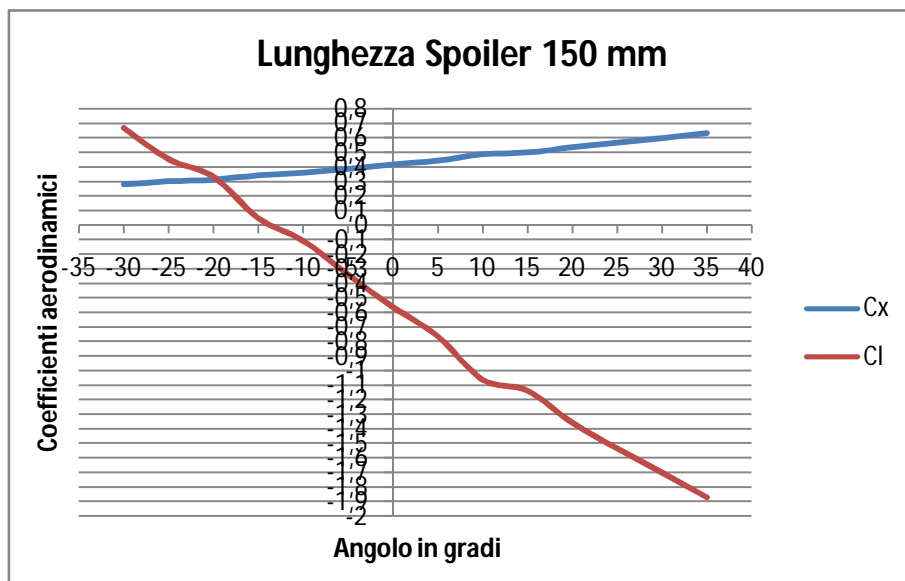


Figura 3.37 Andamento coefficienti aerodinamici in funzione dell'angolo: 150 mm.

Il più basso C_x si ha con la configurazione "angolo -30° , lunghezza 150 mm". I risultati delle analisi CFD relativi a questa configurazione sono:

$$C_x=0.283$$

$$C_l=0.671$$

Il coefficiente di penetrazione presenta un valore molto migliore rispetto al modello originale, ma, visto l'elevato valore del coefficiente di portanza ad esso associato, che causa una scarsa aderenza al suolo, tale configurazione è comunque da scartare.

La coppia di valori più equilibrata, che consente le migliori prestazioni è relativa alla configurazione "angolo -20° , lunghezza 75 mm"; essa ha fornito i seguenti risultati:

$$C_x=0.327$$

$$C_l=0.217$$

3.4 Conclusioni

Attraverso le modifiche geometriche apportate alla center-line della Fiat Bravo 2007, il coefficiente di resistenza ha subito una riduzione del 3,7% rispetto al modello originale. Questa riduzione di resistenza è imputabile al fatto che lo spoiler così disegnato, permette alla corrente fluida di staccarsi in ritardo dalla superficie, e di conseguenza, di ritardare la formazione dei vortici turbolenti (figura 3.38).

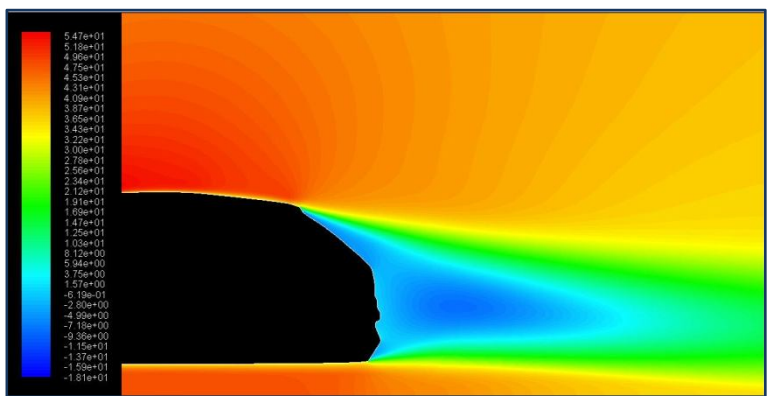


Figura 3.38 Contour delle velocità nella direzione orizzontale: configurazione -20°, 75 mm.

Le forze calcolate (espresse in Newton), sia nella direzione del moto (asse orizzontale) che nella direzione ortogonale ad esso (verticale) ed i coefficienti aerodinamici sono indicati nelle tabelle 3.7 e 3.8.

Tabella 3.7 Forze e coefficienti in direzione x.

Pressure	Viscous	Total	Pressure	Viscous	Total
Force	Force	Force	Coefficient	Coefficient	Coefficient
577.616	49.528	627.145	0.301	0.025	0.327

Tabella 3.8 Forze e coefficienti in direzione y.

Pressure	Viscous	Total	Pressure	Viscous	Total
Force	Force	Force	Coefficient	Coefficient	Coefficient
412.139	5.022	417.161	0.215	0.002	0.217

Si è infine realizzato, un modello modificato della Bravo che comprendesse tutte le modifiche apportate alla geometria della center-line (figura 3.39).

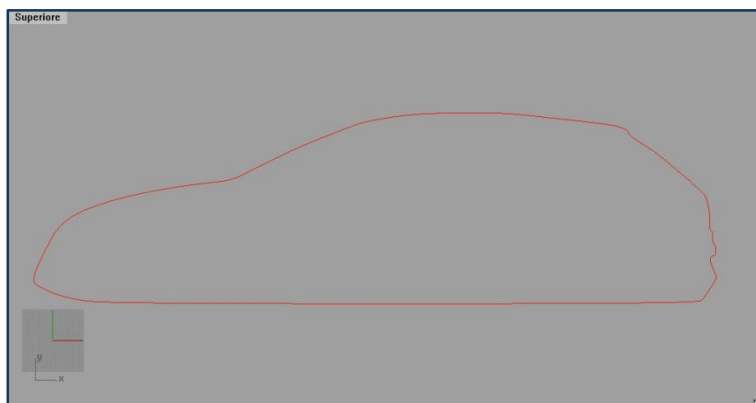


Figura 3.39 Raggruppamento delle modifiche.

Nelle figura 3.40, invece, è possibile osservare chiaramente come è cambiata la sagoma dell'autovettura a seguito delle variazioni apportate al disegno della center-line.

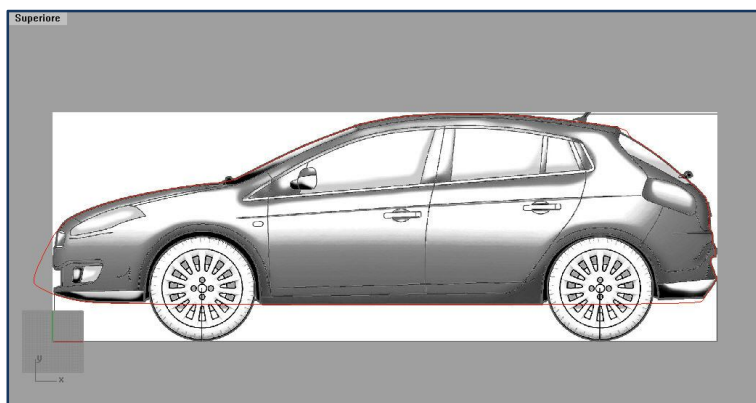


Figura 3.40 Confronto tra il modello originale e il modello modificato.

Le analisi CFD sul modello originale e su quello che comprende tutte le modifiche geometriche apportate, hanno fornito i seguenti risultati:

$$C_x=0,340$$

$$C_l=0,101$$

$$C_x=0.317$$

$$C_l=0.164$$

Le forze misurate (esprese in Newton) sono mostrate nelle tabelle 3.9 e 3.10.

Tabella 3.9 Forze e coefficienti in direzione x.

Pressure Force	Viscous Force	Total Force	Pressure Coefficient	Viscous Coefficient	Total Coefficient
553.648	54.708	608.356	0.289	0.028	0.317

Tabella 3.10 Forze e coefficienti in direzione y.

Pressure Force	Viscous Force	Total Force	Pressure Coefficient	Viscous Coefficient	Total Coefficient
309.162	5.389	314.551	0.161	0.002	0.164

Si evidenziano in particolare:

- una riduzione del C_x del 9.6 % rispetto al modello originale;
- un aumento del C_l del 60% rispetto al modello originale.

4. Sostentatori idrodinamici

4.1 Introduzione

Lo studio in oggetto è mirato alla progettazione di due ipersostentatori idrodinamici da porre tra gli scafi di un catamarano adibito al trasporto passeggeri al fine di permetterne la diminuzione di pescaggio e quindi la riduzione della sua superficie bagnata.

L'ala più semplice che si possa progettare ha forma rettangolare (figura 4.1) ed è caratterizzata dalle seguenti grandezze:

- apertura alare, b
- corda alare, c
- allungamento, b/c
- superficie alare, $b \cdot c$

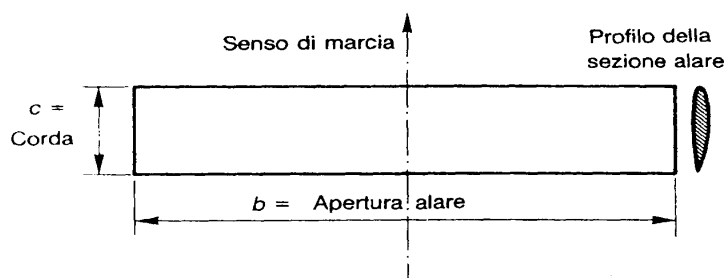


Figura 4.1 Caratteristica geometrica dell'ala rettangolare.

Le forze aerodinamiche (figura 4.2), sono prodotte dalla distribuzione delle pressioni che si destano sull'intradosso e sull'estradosso dell'ala a causa di un flusso fluido che la lambisce. L'entità e le caratteristiche di tali distribuzioni dipendono essenzialmente dalla forma del profilo, dal suo assetto nella corrente fluida ed, ovviamente dalle caratteristiche del fluido stesso.

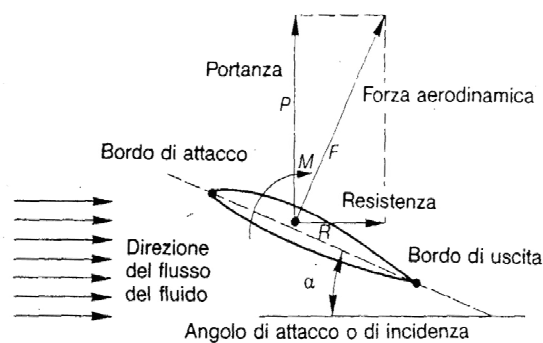


Figura 4.2 Sistema di forze che caratterizzano il profilo alare.

La forza aerodinamica F viene normalmente decomposta in due componenti; una componente P , che prende il nome di portanza, nella direzione normale rispetto alla direzione del flusso del fluido, e un'altra componente R , chiamata resistenza, nella direzione del flusso del fluido (Marchaj, 1976). Le relazioni con cui si calcolano le forze ed i momenti ad esse associati sono le seguenti:

$$F = \frac{1}{2} \rho C_F A v^2 = \sqrt{P^2 + R^2}$$

$$P = \frac{1}{2} \rho C_P A v^2$$

$$R = \frac{1}{2} \rho C_R A v^2$$

$$C_F = \sqrt{C_P^2 + C_R^2}$$

dove ρ è la densità dell'aria, A la superficie portante, v la velocità relativa tra fluido e ala, C_F , C_P , e C_R sono i coefficienti rispettivamente di forza aerodinamica, di portanza e di resistenza.

I coefficienti sopra esposti, e quindi le caratteristiche fluidodinamiche dell'ala stessa, sono strettamente legati al profilo scelto; proprio per questo motivo, a monte della progettazione dell'ala è necessario provvedere ad uno studio approfondito che porti alla scelta del profilo da adottare per la realizzazione degli ipersostentatori.

A tale scopo è necessario partire dalla conoscenza del carico che le ali devono sopportare e di conseguenza della variazione del pescaggio che vogliamo ottenere mediante l'utilizzo degli ipersostentatori.

Questo studio preliminare viene condotto senza l'utilizzo di codici di fluidodinamica computazionale, ma soltanto tramite formule semiempiriche che, seppur prendendo in considerazione esclusivamente le forze di attrito viscoso, permettono di effettuare delle stime sufficienti per effettuare una scelta tra i profili presi in considerazione.

A monte di tutto questo c'è la scelta della configurazione che il catamarano con gli ipersostentatori deve avere (Hoppe, G.W., 1989). La figura 4.3 mostra vari tipi di configurazioni tra cui è stata scelta quella denominata "tandem" perché giudicata quella che garantisce migliore stabilità dell'imbarcazione e maggior confort, caratteristica fondamentale per un catamarano adibito al trasporto passeggeri.

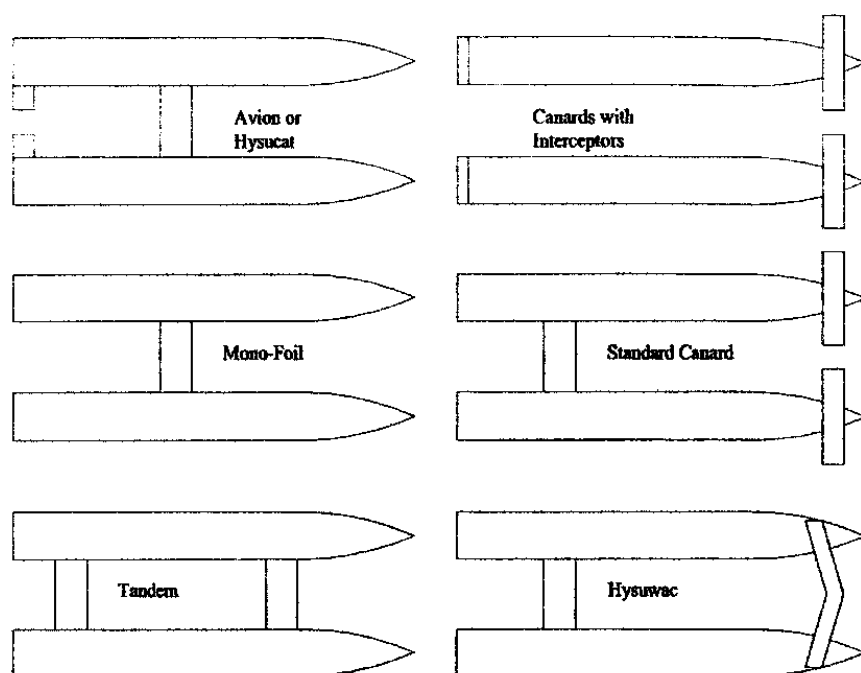


Figura 4.3 Soluzioni alternative per catamarani con profili alari

Tramite il software Rhinoceros è stato possibile valutare il valore del dislocamento e delle superfici bagnate degli scafi del catamarano al variare del loro pescaggio; l'immersione è stata

fatta variare dal valore nullo (scafo emerso) ad un massimo di 0,136 m con step di 1 e 2 mm. Molto importante è stata la scelta della velocità di avanzamento del catamarano. In uno studio di ottimizzazione (che ha portato alla forma attuale del catamarano che utilizzeremo noi) effettuato in precedenza presso la facoltà di ingegneria meccanica dell'università di Palermo, sono state condotte delle analisi CFD in un range di velocità abbastanza ampio per un modello in scala, variabile da 0,7 m/s a 3,7 m/s.

In prima analisi, dalle sole formule semi empiriche, è evidente che gli ipersostentatori idrodinamici possono offrire un beneficio in termini di risparmio energetico soltanto oltre un dato regime di velocità. Per questo la scelta definitiva della velocità da utilizzare sia per impostare lo studio numerico preliminare sia per le analisi CFD è stata di 3 m/s.

Sotto questa velocità, infatti, il catamarano con gli ipersostentatori dissipa più energia di quello senza ali pur navigando con un pescaggio minore e quindi con minore superficie bagnata.

Una volta scelto il profilo alare e stabilito il regime di velocità adeguato sono state effettuate le analisi CFD sul catamarano con le ali i cui risultati sono stati comparati con quelli del catamarano senza ali ottenuti mediante prove sperimentali in vasca navale (Damiano C. e altri, 2009). Gli stessi risultati sono stati precedentemente utilizzati per "tarare" le analisi CFD del catamarano senza ali (in modo da far aderire i risultati numerici a quelli sperimentali) per rendere attendibile il confronto dei dati.

Lo scafo in condizioni di progetto presenta le caratteristiche mostrare nella tabella 4.1.

Tabella 4.1 Caratteristiche idrostatiche del catamarano.

Immersione (m)	Sollevamento (m)	C_F	Δ (kg)
0,136	0	0.00366	36,69
S (m²)	L_{WL} (mm)	R_e	R_F (N)
1,047	1615,81	3376315	17,201

Nelle colonne in ordine troviamo l'immersione, il sollevamento, il coefficiente di attrito, il dislocamento, la superficie bagnata, la lunghezza al galleggiamento, il numero di Reynolds e la resistenza d'attrito.

4.2 Progetto dei sostentatori idrodinamici

La scelta del profilo alare da adottare per la costruzione dei sostentatori parte da due presupposti fondamentali:

- è necessario ottenere alti valori di portanza a basse velocità e piccoli angoli di incidenza;
- il modo in cui le ali dovranno funzionare consentono l'utilizzo di profili asimmetrici.

Secondo quanto detto, tra le tante alternative possibili, il profilo scelto (Abbott, I.H., Von Doenhoff, A.E., 1959) è il NACA 4421 (figura 4.4) che per altro è frequentemente utilizzato in ambito idrodinamico ed in particolare in soluzioni di scafi con appendici per il sostentamento idrodinamico.

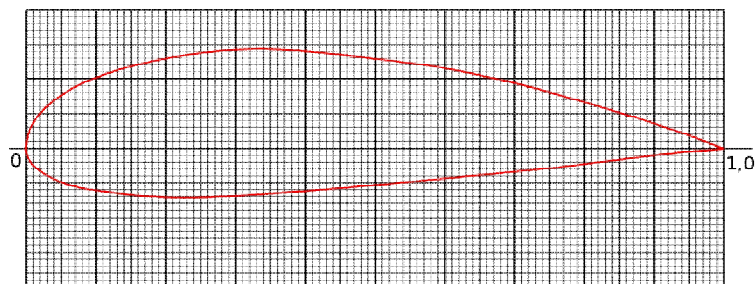


Figura 4.4 Profilo alare NACA 4421 ad incidenza nulla.

Dalla formula che ci permette di ottenere la portanza è evidente che essa dipende dalla densità del fluido, dalla velocità relativa tra quest'ultimo e l'ala, dal coefficiente fluidodinamico e dalla superficie dell'ala. Stabilito il carico che vogliamo far sopportare all'ala e fissata la velocità a cui essa si muove, le incognite da determinare sono due: la corda del profilo alare (visto che la lunghezza dell'ala è nota e pari alla distanza tra gli scafi del catamarano) e il coefficiente fluidodinamico C_p . Le due variabili in realtà sono legate dal numero di Reynolds, perché se imponiamo un valore di corda, fissata la velocità, determiniamo il numero di Reynolds che a sua volta influisce sul valore di C_p ; sostanzialmente non è possibile risolvere il sistema perché abbiamo una equazione e due incognite.

Per ovviare al problema è stata fatta variare la corda del profilo dal valore di 5 mm fino a 100 mm con intervalli di 5 mm e per ogni valore di corda è stato calcolato il corrispondente numero di Reynolds. A questo punto, mediante l'utilizzo dei software Profili 2 e XFLR5, dopo aver selezionato il NACA 4412 come profilo, per ogni numero di Reynolds calcolato, sono state condotte le simulazioni del profilo per la stima della sua portanza e della sua resistenza facendo variare l'angolo di incidenza del fluido da un valore di 0° ad uno di 5° con step di 0.5°. Conoscendo tutti i valori del dislocamento al variare del pescaggio, è stato possibile trovare tutti quei valori di coincidenza tra la portanza necessaria al sollevamento dello scafo e la portanza effettiva dell'ala. Il sollevamento che si vuole ottenere grazie ai sostentatori è di 104 mm che risulta essere il massimo consentito affinché resti un pescaggio di 32 mm; tale valore consente alle ali di rimanere immerse evitando fenomeni fluidodinamici dissipativi e la conseguente riduzione di efficienza delle ali. Per questo motivo è necessario che il rapporto h_w/c (h_w è il battente d'acqua sopra l'alettone e c la lunghezza della corda del profilo) sia pari ad almeno 0,2. Considerando che la lunghezza media dei due alettoni (che hanno lunghezza leggermente diversa a causa della conformazione degli scafi e del loro posizionamento), imposta dalla distanza tra i due scafi, è di 0,532 m, il valore della corda che garantisce una portanza sufficiente per il sollevamento richiesto è di 60 mm con un angolo di incidenza dell'ala di 5°. Le nuove condizioni idrostatiche con la presenza degli ipersostentatori sono mostrati nella tabella 4.2.

Tabella 4.2 Caratteristiche statiche e dinamiche dopo il sostentamento degli alettoni.

Immersione (m)	Sollevamento (m)	C_F	Δ (kg)
0,032	0,104	0.0036,76	5,28
S (m²)	L_{WL} (mm)	R_e	R_f (N)
0,348	1588,24	3318710	5,739

La resistenza d'attrito è scesa da 17,201 N (catamarano originale) a 5,739 N (catamarano con ipersostentatori). A quest'ultimo valore di resistenza va sommata la resistenza dei due alettoni, che è di 2,782 N per ciascun alettone. La resistenza complessiva all'avanzamento risulta quindi pari a 11,303 N, valore che permette di ottenere una diminuzione della resistenza pari al 34 %. Va ricordato che questa riduzione di resistenza non considera la

resistenza residua (Hoerner S.F., 1965) e cioè quella legata alla formazione ed alla propagazione delle onde. La sua valutazione può essere fatta mediante le analisi CFD.

4.3 Analisi CFD

4.3.1 Pre-Processing

Il sistema fisico oggetto del nostro studio, vista la simmetria sia geometrica che fisica che lo contraddistingue, è considerato soltanto per metà della sua estensione trasversale. La geometria dei semiscafi del catamarano è stata riprodotta avvalendosi del software Rhinoceros. Va ricordato che il modello CAD del catamarano senza alettoni era già a nostra disposizione in quanto già oggetto di uno studio precedente.

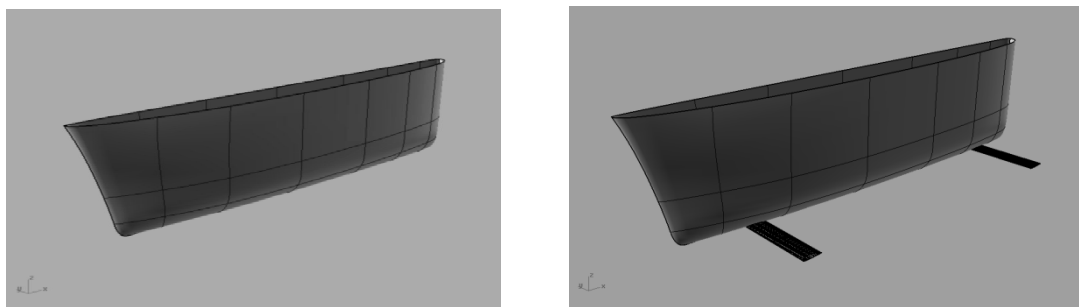


Figura 4.5 Rendering delle superfici del semiscafo del catamarano con e senza alettoni.

Il catamarano con gli ipersostentatori è stato ricavato aggiungendo i due alettoni nel modello CAD già esistente (figura 4.5). La figura 4.6 successiva mostra la posizione longitudinale dei due ipersostentatori e la loro posizione rispetto alla nuova linea di galleggiamento.



Figura 4.6 Semiscafo del catamarano tandem in vista.

Nelle figure successive (figure 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10) sono mostrate alcune immagini renderizzate dei modelli CAD dei due catamarani.

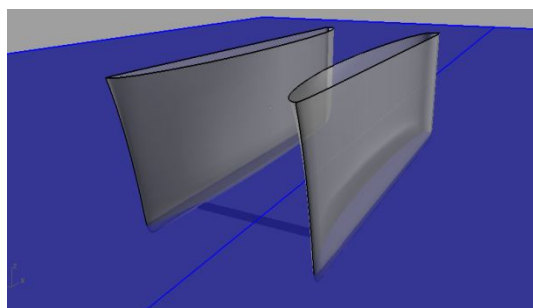
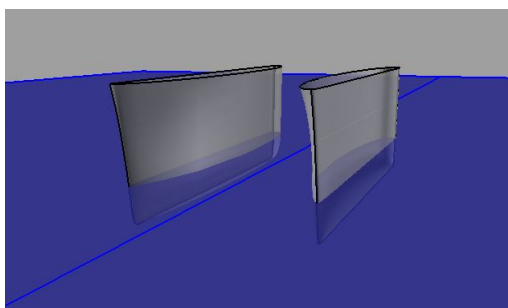


Figure 4.7 e 4.8 Rendering delle superfici del catamarano senza alettoni con il piano di galleggiamento in trasparenza.

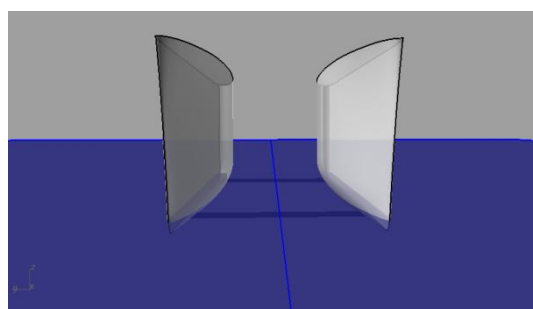
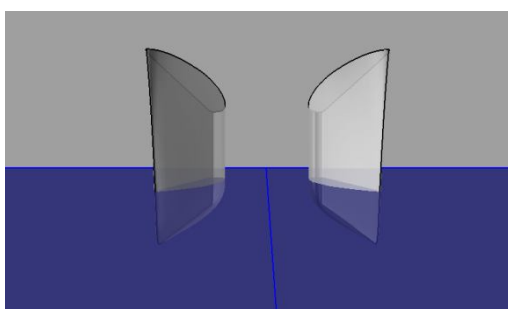


Figure 4.9 e 4.10 Rendering delle superfici del catamarano senza alettoni con il piano di galleggiamento in trasparenza.

L'assegnazione delle condizioni al contorno, come in ogni analisi CFD, richiede che si consideri un volume di controllo sufficientemente esteso affinché, alle estremità di tale dominio, il fluido non risenta dell'influenza dello scafo e possa considerarsi indisturbato (Bruzzone, D., Ferrando, M., Gualeni, P., 1999). A tal fine è stato costruito un dominio con le seguenti caratteristiche

geometriche: $2 L_{WL}$ a prua, $4 L_{WL}$ a poppa e $2,5 L_{WL}$ di fianco. Le figure 4.11 e 4.12 mostrano il volume di controllo e la divisione tra aria e acqua per i due catamarani.

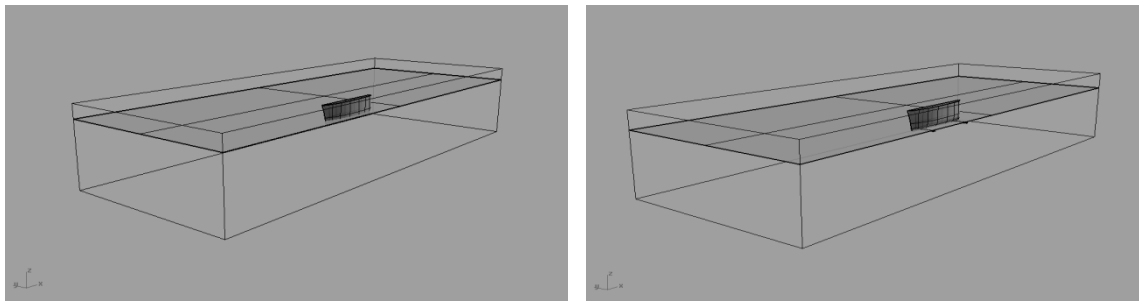


Figura 4.11 e 4.12 Catamarano senza e con alettoni in volume di controllo.

Per lo studio di entrambi i catamarani è stata generata una mesh strutturata con il software Ansys Icem CFD 11.0.

Nelle figure 4.13 e 4.14 è mostrato la geometria del modello del catamarano senza ali e il relativo volume di controllo.

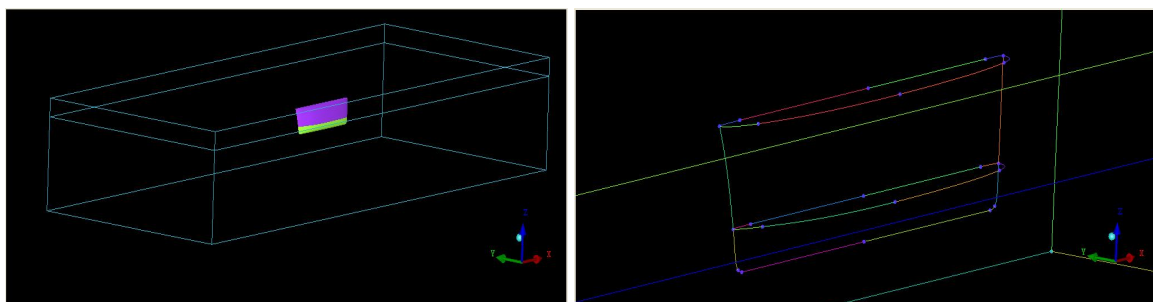


Figure 4.13 e 4.14 Catamarano e particolare del catamarano in ambiente Icem.

Nelle figure 4.15 e 4.16 è mostrata la strategia di blocking utilizzata per la strutturazione della mesh.

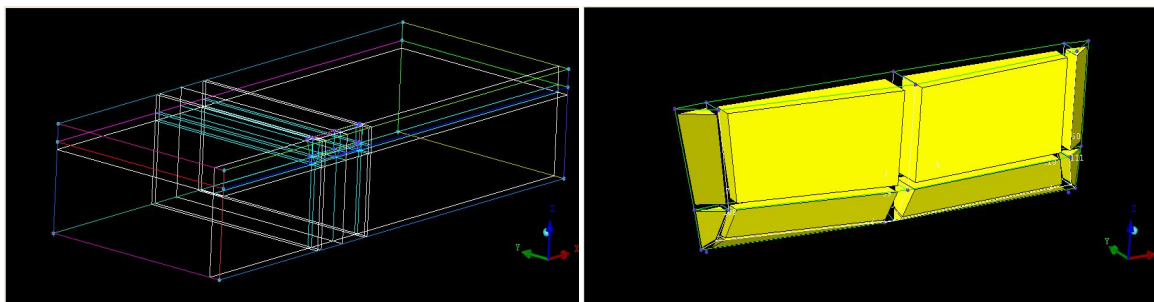


Figure 4.15 e 4.16 Suddivisione a blocchi del dominio e particolare delle divisione in blocchi del solo semiscafo.

Nelle figura 4.17 è mostrata la discretizzazione del solo semiscafo ed è possibile evidenziare l'infittimento della mesh a poppa e a prua dello scafo e in prossimità della linea di galleggiamento.

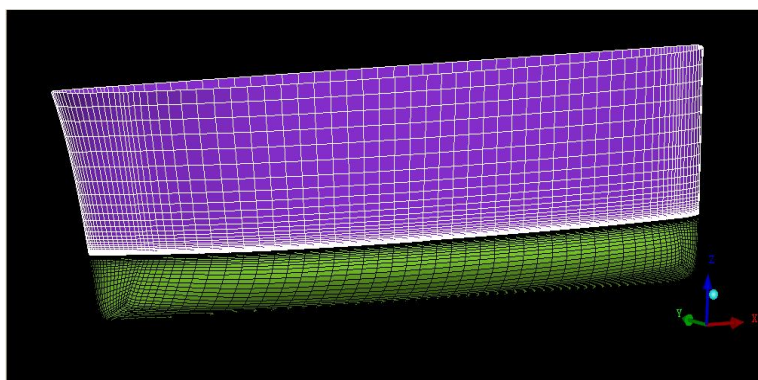


Figura 4.17 Discretizzazione del semiscafo

E' importante sottolineare che la discretizzazione del dominio del catamarano con gli ipersostentatori ha presentato maggiori difficoltà proprio a causa della presenza delle ali che hanno reso la strategia di blocking più difficoltosa.

La figure 4.18 e 4.19 mostrano rispettivamente la geometria del modello e la divisione in blocchi del volume di controllo.

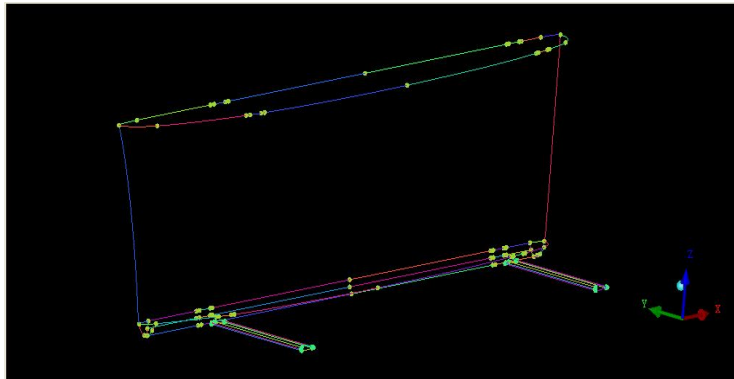


Figura 4.18 Geometria del catamarano tandem in ambiente Icem.

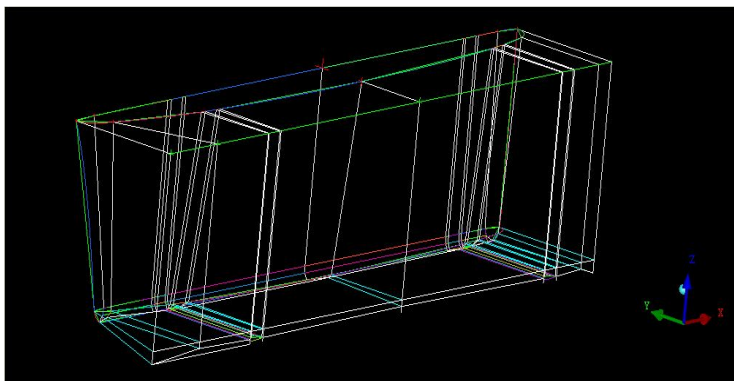


Figura 4.19 Particolare della suddivisione in blocchi del catamarano tandem.

La figura 4.20 mostra la mesh di superficie del catamarano tandem.

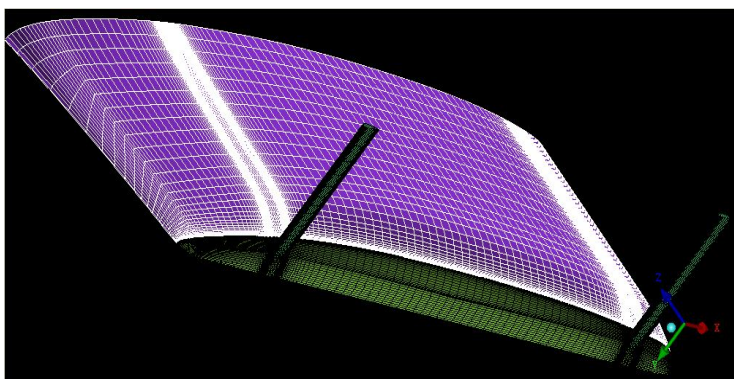


Figura 4.20 Mesh di superficie del semiscafo tandem.

4.3.2 Solving

L'analisi CFD effettuata è di tipo stazionario (steady), il modello multifase scelto è il VOF (volume of fluid) e il modello di turbolenza è il K – ϵ standard con standard wall functions (Salas M. e altri).

Le condizioni al contorno (Xia, F., 1986; Battistin, D., 1999) mostrate nella figura 4.21, sono le seguenti:

- superfici 1, 2, 3, 4, 5 e 6: velocity inlet;
- superfici 7 e 8: symmetry;
- superfici 9 e 10: outflow.

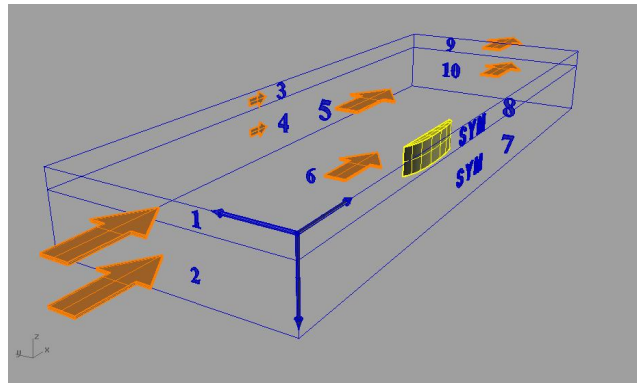


Figura 4.21 Condizioni al contorno.

L'algoritmo di accoppiamento pressioni-velocità scelto è il SIMPLE in quanto efficiente e particolarmente stabile nel trattamento di problemi complessi coinvolgenti fenomeni legati alla turbolenza.

Per quanto riguarda i valori degli under-relaxation factors, sono stati scelti dei valori molto più conservativi rispetto ai valori di default per garantire una più rapida convergenza dei risultati e una maggiore stabilità.

4.3.3 Post-Processing

Come già detto in precedenza è stato possibile valutare l'attendibilità dei risultati ottenuti dalle analisi CFD sul catamarano senza ipersostentatori facendo un confronto con i dati sperimentali ricavati da prove in vasca effettuate su un modello del catamarano stesso. Tali prove sperimentali sono state oggetto di pubblicazione al convegno internazionale NAV di

Messina nel 2009. Questa pubblicazione, che oltre ai dati sperimentali fornisce dati numerici ottenuti tramite analisi CFD, sono stati la nostra base per validare i risultati da noi determinati. Una volta validati i risultati delle analisi del catamarano originale è stato possibile operare un confronto con i risultati ottenuti dalle analisi del catamarano tandem. Nella tabella 4.3 sono mostrati i risultati delle analisi CFD da noi effettuate e risultati sia numerici che sperimentali presenti nella pubblicazione del NAV.

Tabella 4.3 Confronto con i dati del NAV 2009.

	resistenza complessiva (N)	errore %
prove in vasca NAV	47,55	-
analisi CFD NAV	46,43	2,35
analisi CFD studio	48,6	2,2

La stima dell'errore ha dato la possibilità di poter operare un secondo confronto tra il catamarano e il catamarano tandem conservando le caratteristiche generali dello studio numerico.

I risultati delle analisi sulle due configurazioni sono mostrati nella tabella 4.4.

Tabella 4.4 Resistenza all'avanzamento del catamarano e del catamarano tandem.

	catamarano	catamarano tandem
R_{opera morta} (N)	9,1	3,8
R_{opera viva} (N)	39,5	6,8
R_{alettoni} (N)	-	19,6
R_{complessiva} (N)	48,6	29,8

Dalla tabella precedente si nota che la riduzione di resistenza all'avanzamento è del 38%. In fase di progetto degli alettoni, il beneficio percentuale stimato era del 34%. Il piccolo scostamento tra questi due risultati è imputabile al fatto che in fase di progetto la resistenza complessiva degli ipersostentatori è stata stimata in 5,564 N mentre dalle analisi CFD si è attestata ai 19,6 N, cioè più del triplo.

Ciò dimostra l'importanza dell'utilizzo di codici CFD; in fase progetto, utilizzando soltanto relazioni semi empiriche, sono state trascurate tutte quelle componenti di resistenza legate ai

fenomeni turbolenti attorno agli ipersostentatori e soprattutto al ristagno del fluido nelle vicinanze dell'attacco tra carena e ipersostentatori, così come l'interferenza tra il primo ed il secondo ipersostentatore. Nella tabella 4.5 sono riassunti i valori di resistenza ottenuti nelle analisi CFD.

Tabella 4.5 Resistenza complessiva di carena dei due catamarani.

	catamarano	catamarano tandem
R_{carena} (N) (progetto)	17,201	5,739
R_{carena} (N) (analisi CFD)	39,5	6,4

Interessante notare come la differenza tra i risultati tra catamarano e catamarano tandem sia molto più marcata per quelli ottenuti mediante analisi CFD che per quelli ottenuti con le relazioni semi-empiriche. Questa differenza è giustificata dal fatto che il catamarano originale ha un pescaggio molto maggiore di quello tandem e questo implica una formazione ondosa, e quindi una resistenza residua, molto maggiore rispetto al caso del catamarano tandem in cui il pescaggio è stato da noi imposto da progetto a 32 mm. Ciò dimostra a maggior ragione l'utilità delle analisi CFD soprattutto in quei casi in cui la valutazione di alcune componenti di resistenza (come quella residua appunto) sono difficili da valutare tramite relazioni matematiche o empiriche.

Le figure 4.22a, b, c e d, mostrano le differenze tra le formazioni ondose dei due catamarani in esame.

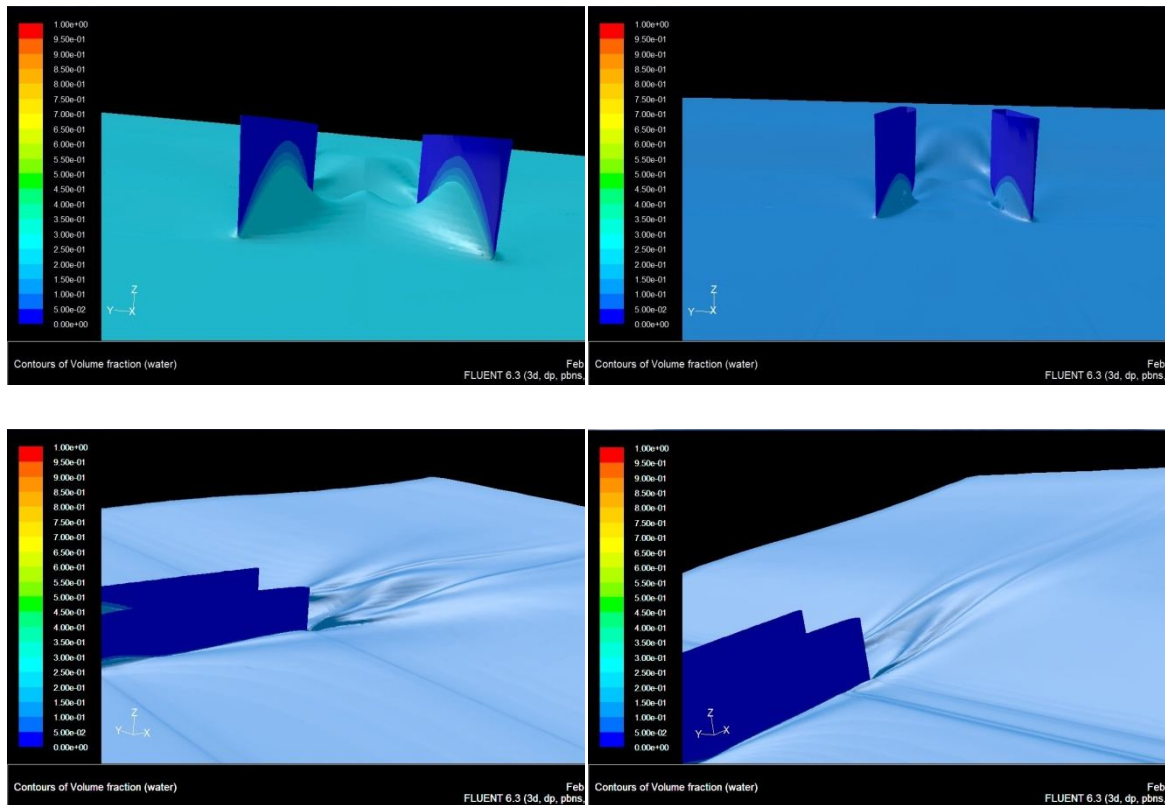


Figure 4.22 a, b, c e d Vista dei treni d'onda formati dal catamarano senza e con alettoni.

Dalle figure precedenti è possibile apprezzare la differenza di formazione ondosa tra i semiscafi; il catamarano originale ha una formazione ondosa molto più pronunciata che causa inoltre un aumento della superficie bagnata e quindi della resistenza d'attrito viscoso. Le immagini mostrano anche i treni d'onda dei due catamarani che, anche in questo caso, risultano molto più pronunciati del caso del catamarano senza sostentamento.

4.4 Conclusioni

Lo scopo di questo studio era quello di determinare, qualora ce ne fossero, i benefici ottenibili mediante l'introduzione di due ipersostentatori tra gli scafi di un catamarano per il trasporto passeggeri.

Il primo passo dello studio è consistito nella progettazione della singola ala ed in particolare nella scelta del profilo da adottare e nella determinazione delle caratteristiche geometriche che quest'ultima deve possedere per sostenere l'aliquota di carico che le compete. Questa prima fase del progetto è avvenuta mediante relazioni semiempiriche che hanno permesso di disegnare l'ala e valutarne le componenti di resistenza e portanza.

Lo studio, con l'utilizzo di relazioni semiempiriche, dell'ala e la stima delle prestazioni sia del catamarano originale che di quello con ipersostentatori, ha mostrato una riduzione della resistenza pari al 34%; in questa prima fase però non è stato possibile stimare la resistenza residua per la cui valutazione è stato necessario effettuare successivamente delle analisi CFD.

I risultati di queste analisi hanno confermato il beneficio dell'adozione degli ipersostentatori stimando una riduzione di resistenza di circa il 38%.

Tuttavia, questo beneficio è ottenibile soltanto a velocità di crociera poiché al diminuire della velocità di avanzamento del catamarano la forza di portanza cala bruscamente causando l'immersione degli scafi, l'aumento della resistenza d'attrito e di quella residua, e l'annullamento degli effetti benefici apportati dalla presenza degli ipersostentatori idrodinamici.

5 Interazione albero-vela al variare della forma della sezione dell'albero

5.1 Introduzione

Come si vede in figura 5.1, dal punto 1 in poi la velocità della corrente fluida che investe un corpo a sezione circolare aumenta fino ad un valore massimo nel punto 2; allo stesso modo la pressione statica diminuisce fino ad un minimo nello stesso punto. Dal punto 2 in poi si assiste, invece, ad una diminuzione della velocità e ad un aumento di pressione fino al punto 4. A causa della sua viscosità, però, l'aria subisce nello strato limite, quando fluisce intorno al corpo, un ritardo supplementare che le impedisce di seguire i contorni del corpo distaccandosene e continuando il suo cammino in maniera vorticoso.

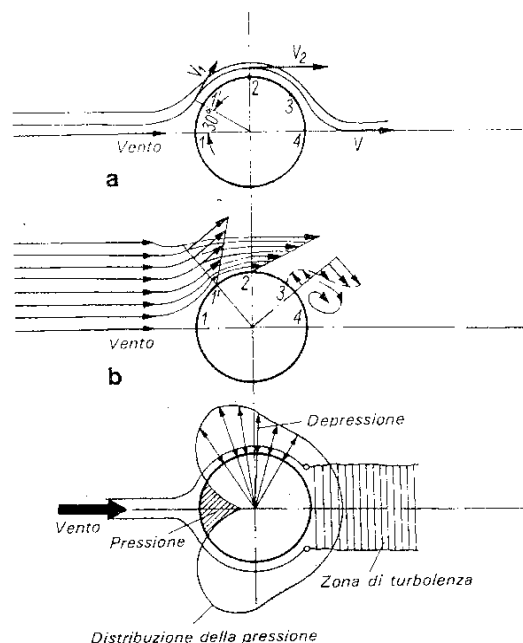


Figura 5.1 Corpo a sezione cilindrica investito da una corrente fluida.

Nella stessa figura è visibile (figura 5.1 b) la formazione di un vortice che causa dissipazione energetica e diminuzione della pressione sulla parte superiore e retrostante del corpo. Questa resistenza viene denominata "resistenza di forma" e una sua valutazione qualitativa si ottiene dalla estensione della superficie interessata dalla corrente turbolenta lasciata a valle del corpo investito dalla corrente fluida.

Per ottenere una ridotta resistenza di forma, il corpo dovrebbe avere un profilo aerodinamico ed offrire alla corrente un percorso che faccia variare gradualmente le sue linee di flusso.

Un esempio tipico di resistenza di forma è quello che si verifica nell'armo di un'imbarcazione a vela a causa della presenza dell'albero che costituisce un ostacolo all'aria che lambisce la vela nel suo bordo di attacco. Nella figura 5.2 è possibile osservare varie sezioni di un albero investito da una corrente fluida e per ogni sezione è mostrato il coefficiente di resistenza relativo al profilo.

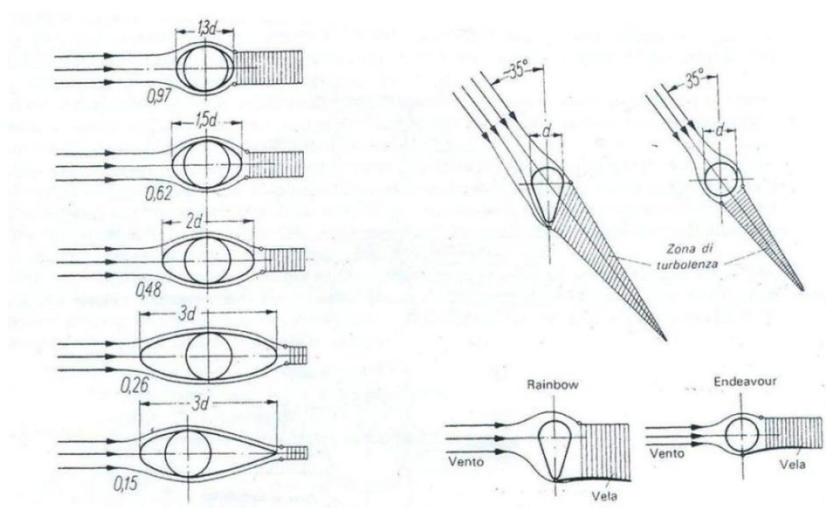


Figura 5.2 Coefficienti di resistenza per diverse sezioni.

Come si evince dalla figura 5.3, gli alberi delle barche sono realizzati in una grande varietà di forme della sezione trasversale (Larsson, L., Eliasson, R.E., 1997); la necessità di elevate performance degli yacht ha condotto all'utilizzo di aspect-ratio della sezione dell'albero (rapporto tra la dimensione longitudinale e trasversale) molto elevati e, come conseguenza, ad un momento d'inerzia nella direzione longitudinale più elevato rispetto a quello nella direzione trasversale. Un' esigenza importante nella progettazione di un albero, a fronte delle elevate

prestazioni ad esso richieste, è l'ottenimento di una sezione trasversale la cui inerzia assicuri una buona resistenza ma tale da evitare il più possibile qualunque interferenza con la vela.

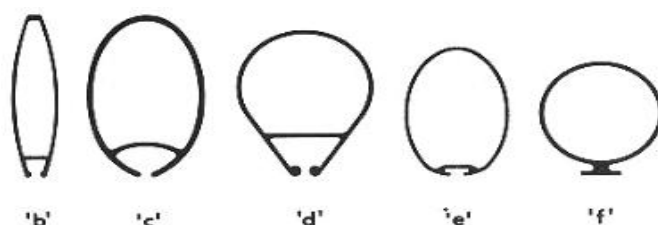


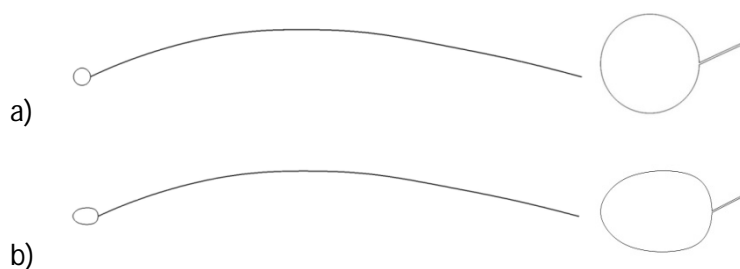
Figura 5.3 Tipiche sezioni di un albero in alluminio.

Scopo di questo lavoro è quello di valutare l'influenza dell'albero di un'imbarcazione a vela sulle prestazioni della vela (randa) ad esso inferita. Si analizzeranno 4 profili della sezione dell'albero e per ogni profilo si valuteranno 4 diversi angoli di incidenza al vento per coprire le andature che vanno dalla bolina stretta a quella larga (Chéret, B., 2003).

5.2 Analisi CFD

5.2.1 Pre-Processing

Le geometrie dei modelli da studiare sono stati riprodotti avvalendosi del software Rhinoceros. Il primo passo è consistito nel disegnare le varie sezioni dell'albero mantenendo una dimensione trasversale uguale per tutte le sezioni pari a 10 cm, e successivamente al tracciamento della sezione della randa (figura 5.4).



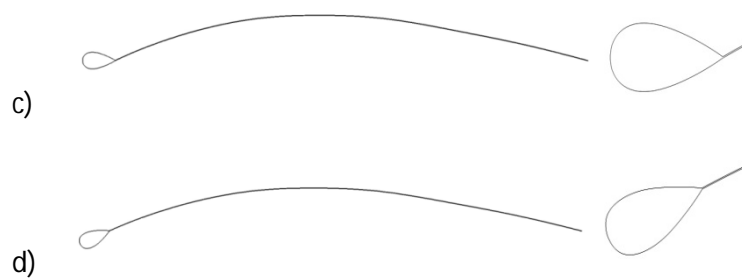
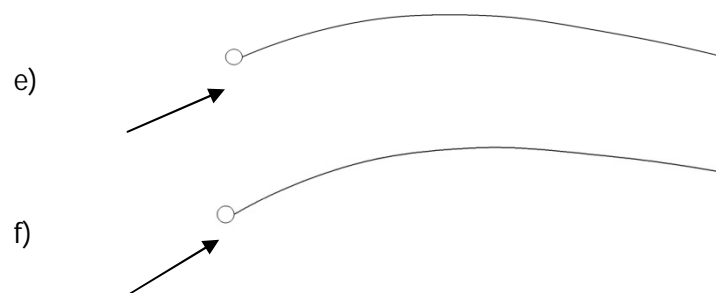


Figura 5.4 I quattro profili delle sezioni trasversali dell'albero: a, profilo circolare; b, profilo ellissoidale; c, profilo alare; d, profilo alare ruotato.

Come si evince dalla precedente figura, le sezioni dell'albero hanno forma:

- circolare;
- ellissoidale;
- alare;
- alare ruotato nella direzione del vento.

Inoltre sono state realizzate quattro differenti posizioni della randa in relazione alla direzione del vento apparente per ognuno dei quattro casi studiati (figura 5.5).



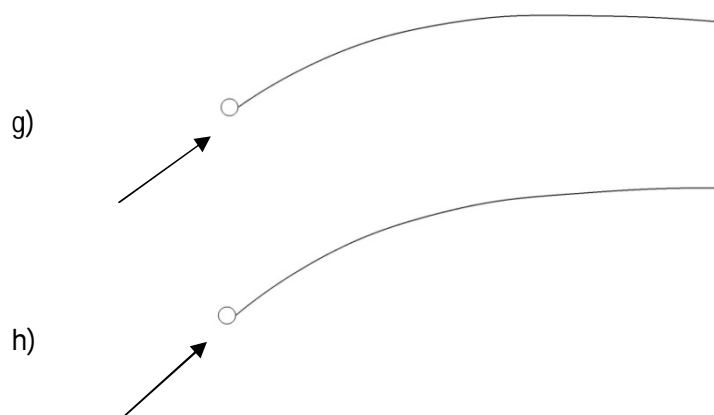


Figura 5.5 Differenti posizioni della randa al variare dell'angolo di incidenza del vento apparente: e, 25°; f, 30°; g, 35°; h, 40°.

Come è evidente mentre per le sezioni, circolare, ellissoidale e alare fisso sono state effettuate differenti analisi tante quanto sono gli angoli di incidenza al vento, per il profilo alare ruotato è stata effettuata una sola analisi con angolo d'attacco di 25°, visto che la sua posizione rispetto al vento si mantiene invariata rispetto alla rotazione del vento stesso.

Dopo la costruzione dei modelli CAD delle 4 configurazioni e delle loro varianti in relazione all'angolo di incidenza al vento, si è provveduto alla realizzazione delle mesh.

Il primo passo è costituito dalla realizzazione del volume di controllo attorno ad esso e cioè dalla definizione dei vertici estremi del dominio e delle curve congiungenti tali vertici che costituiranno i contorni del dominio (figura 5.6).

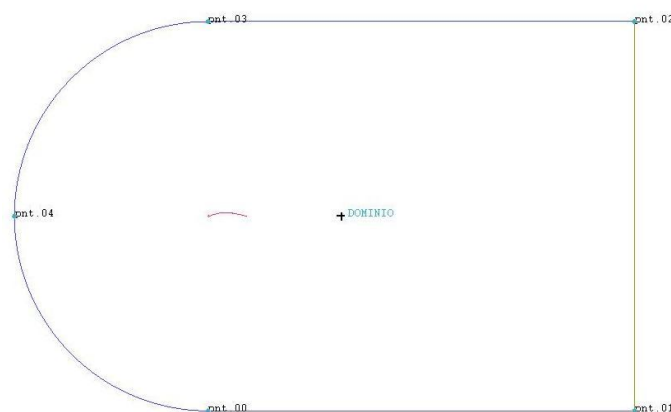


Figura 5.6 Curve e punti del volume di controllo.

La discretizzazione del dominio, come già detto in precedenza, rappresenta certamente la fase più delicata nell'impostazione di un'analisi CFD.

Per lo studio dell'attrezzatura è stata generata una mesh strutturata con elementi quadrilateri. La versione definitiva della topologia a blocchi è mostrata in figura 5.7.

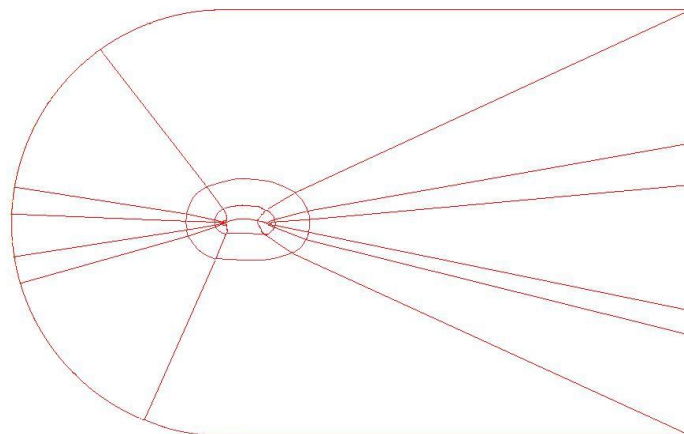


Figura 5.7 Struttura a blocchi.

Sulla base della topologia mostrata in figura 5.7, è stata generata la mesh di cui si mostrano alcuni dettagli nelle figure seguenti (figure 5.8-5.13).

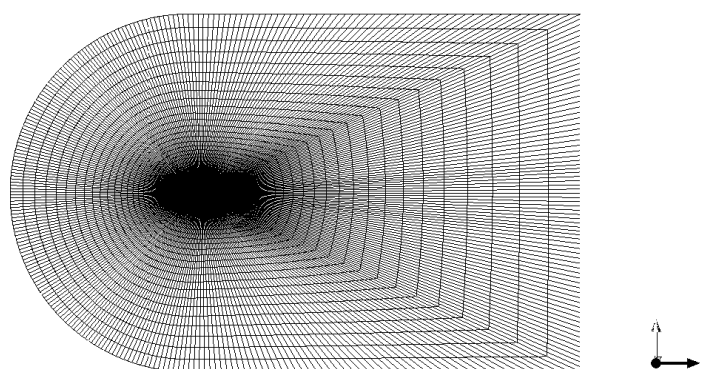


Figura 5.8 Volume di controllo.

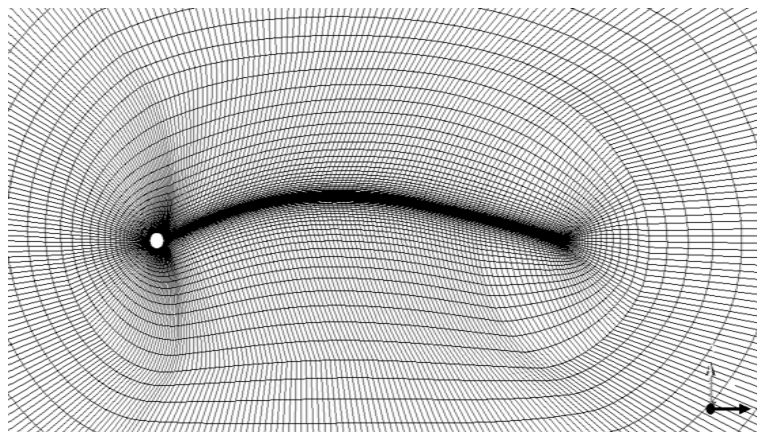


Figura 5.9 Particolare della mesh nelle vicinanze del profilo

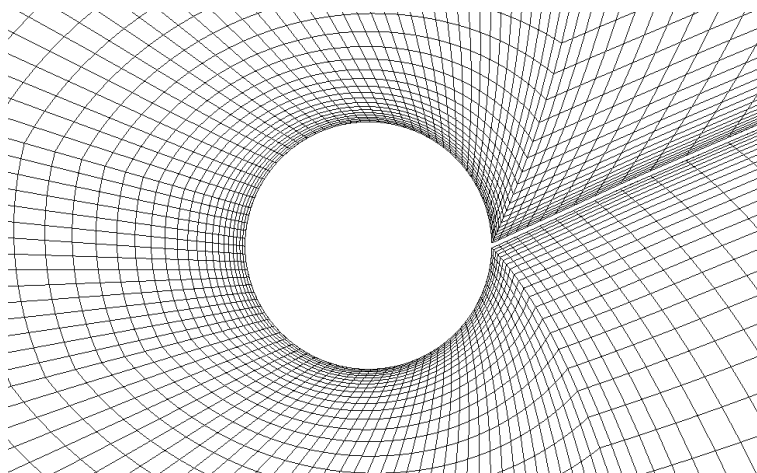


Figura 5.10 Particolare della mesh in corrispondenza dell'albero con profilo circolare.

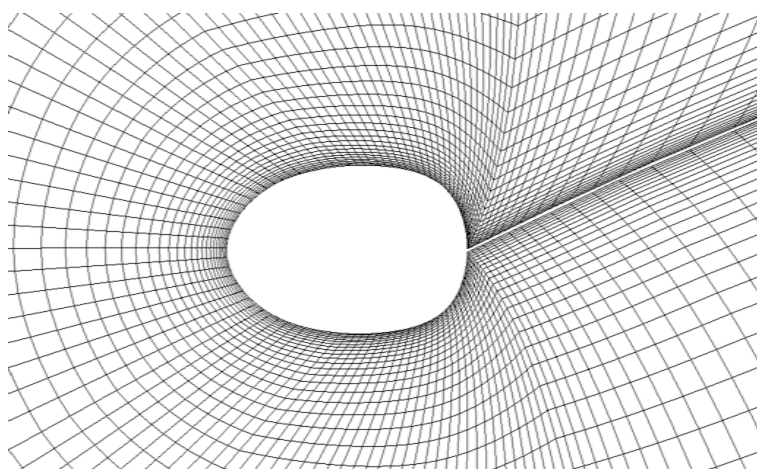


Figura 5.11 Particolare della mesh in corrispondenza dell'albero con profilo ellissoidale.

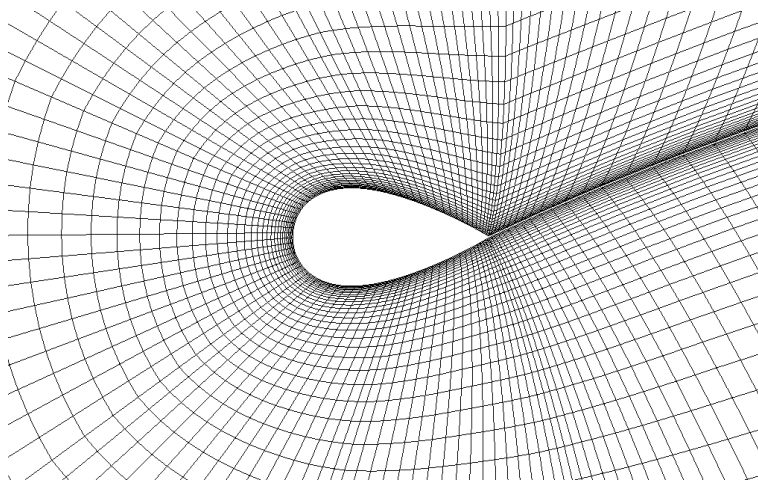


Figura 5.12 Particolare della mesh in corrispondenza dell'albero con profilo alare.

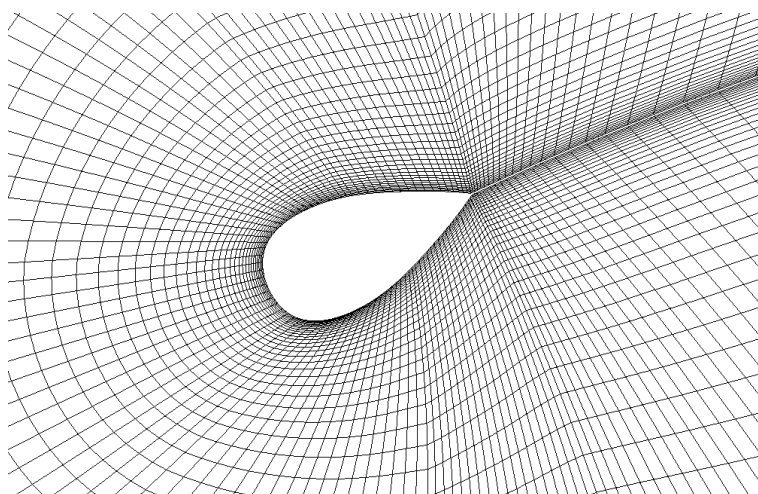


Figura 5.13 Particolare della mesh in corrispondenza dell'albero con profilo alare ruotato.

Tutte le mesh hanno le stesse caratteristiche e risultano costituite da circa 20000 elementi bidimensionali (quads) e 20000 nodi.

5.2.2 Solving

Il modello di turbolenza scelto per le analisi è il K- ϵ standard con trattamento della superficie impostato su "non-equilibrium wall functions", raccomandato nel caso di flussi complessi che comportano separazioni, riattaccamenti ed interferenze del flusso e dove le turbolenze sono soggette a rapidi cambiamenti e gradienti di pressione.

Le condizioni al contorno (Richards, P.J., 1997; Richards, P.J., Johnson, A., Stanton, A., 2001), facendo riferimento alla figura 5.14, sono le seguenti:

- curve 1, 2, e 3: velocity-inlet;
- curva 4: outflow.

La velocità alla quale sono state condotte le analisi è stata posta a 7 m/s.

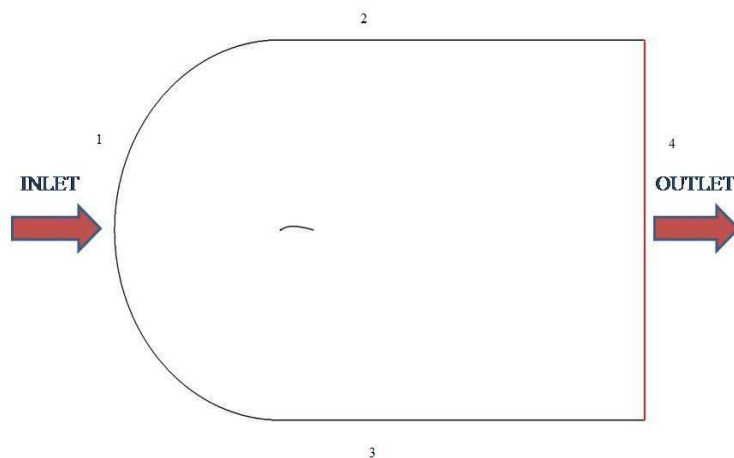


Figura 5.14 Condizioni al contorno.

Per l'algoritmo di accoppiamento pressione-velocità si è optato per il SIMPLE, preferendo per gli under-relaxation factors valori più conservativi di quelli predefiniti, al fine di garantire una maggiore stabilità e velocità per il raggiungimento della convergenza delle analisi.

5.2.3 Post-Processing

Tramite i coefficienti C_L di lift e C_D di drag ottenuti dalle simulazioni dei quattro profili (tabelle 5.1-5.4) è possibile costruire le curve di drag, di lift e di efficienza η (data dal rapporto C_L/C_D) al variare dell'angolo di incidenza al vento (figure 5.15, 5.16 e 5.17).

Tabella 5.1 Coefficiente di portanza, di resistenza e rendimento per l'albero a profilo circolare.

PROFILO	α (°)	C_D	C_L	η
CIRCOLARE	25	0,532	1,318	2,475
	30	0,543	1,193	2,198
	35	0,55	1,010	1,838
	40	0,561	0,793	1,413

Tabella 5.2 Coefficiente di portanza, di resistenza e rendimento per l'albero a profilo ellissoidale.

PROFILO	α (°)	C_D	C_L	η
ELLISSOIDALE	25	0,549	1,354	2,462
	30	0,563	1,254	2,227
	35	0,570	1,023	1,792
	40	0,587	0,851	1,449

Tabella 5.3 Coefficiente di portanza, di resistenza e rendimento per l'albero a profilo alare.

PROFILO	α (°)	C_D	C_L	η
ALARE	25	0,55	1,337	2,431
	30	0,560	1,194	2,130
	35	0,568	1,018	1,790
	40	0,579	0,817	1,410

Tabella 5.4 Coefficiente di portanza, di resistenza e rendimento per l'albero a profilo alare ruotato.

PROFILO	α (°)	C_D	C_L	η
ALARE	25	0,496	1,230	2,477
	30	0,496	1,230	2,477
	35	0,496	1,230	2,477
	40	0,496	1,230	2,477

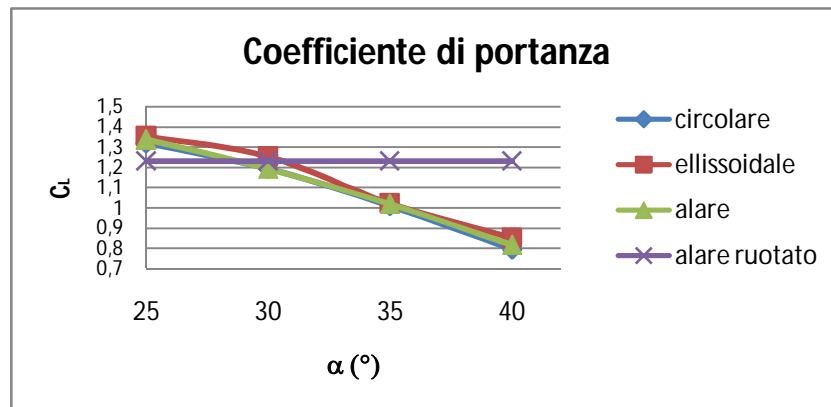


Figura 5.15 Coefficienti di portanza.

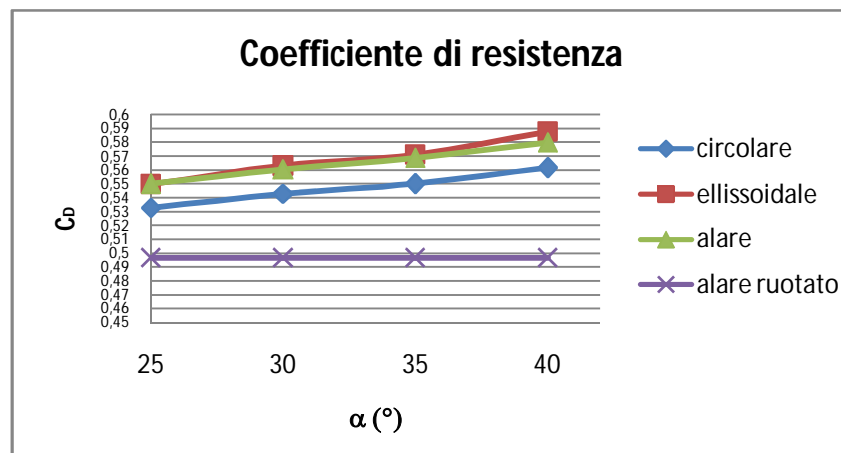


Figura 5.16 Coefficienti di resistenza.

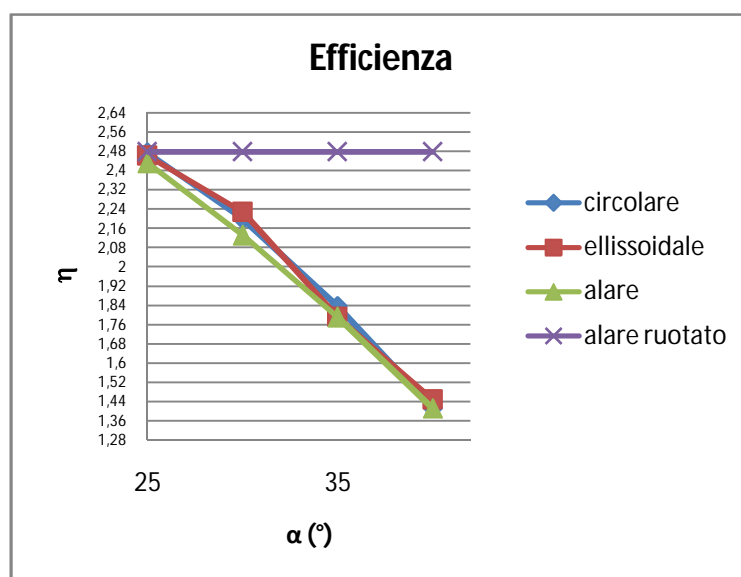


Figura 5.17 Efficienza dei profili analizzati.

Confrontando i risultati è evidente che tra i vari profili analizzati la configurazione con efficienza più bassa è quella dell'albero fisso a profilo alare, mentre quella con efficienza più elevata è quella con albero a sezione alare ruotata. Gli incrementi di efficienza delle altre configurazioni rispetto a quella con profilo alare fisso sono mostrati nelle tabelle 5.5, 5.6 e 5.7.

Tabelle 5.5, 5.6 e 5.7 Incremento di efficienza delle altre configurazioni rispetto a quello con profilo alare fisso.

PROFILO CIRCOLARE		PROFILO ELLISSOIDALE	
α (°)	INCREMENTO %	α (°)	INCREMENTO %
25	1,807	25	1,271
30	3,153	30	4,989
35	2,646	35	0,471
40	0,228	40	4,132

PROFILO ALARE RUOTATO	
α (°)	INCREMENTO %
25	1,878
30	16,245
35	38,339
40	75,631

La bontà della configurazione con albero a sezione alare ruotata rispetto al vento è inoltre dimostrata dai coefficienti di pressione e dai valori delle forze di portanza e resistenza.

Il coefficiente di pressione è un parametro adimensionale definito dall'equazione:

$$C_p = \frac{p - p_{ref}}{q_{ref}}$$

dove p è la pressione statica, p_{ref} è la pressione di riferimento, e q_{ref} è la pressione dinamica di riferimento definita dall'equazione :

$$q_{ref} = \frac{1}{2} \rho_{ref} v_{ref}^2$$

Nel seguito sono riportate alcune immagini che mostrano la distribuzione del coefficiente di pressione attorno all'albero e alla vela (figure 5.18-5.23).

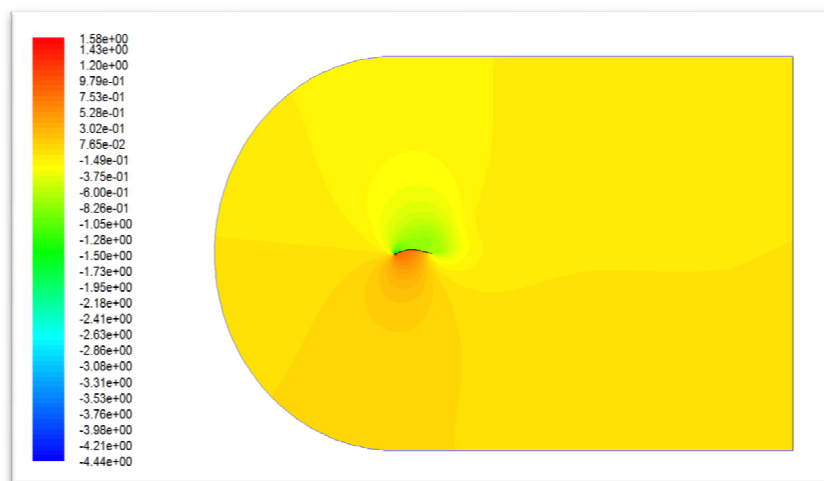


Figura 5.18 Coefficiente di pressione per il profilo alare ruotato rispetto alla direzione del vento.

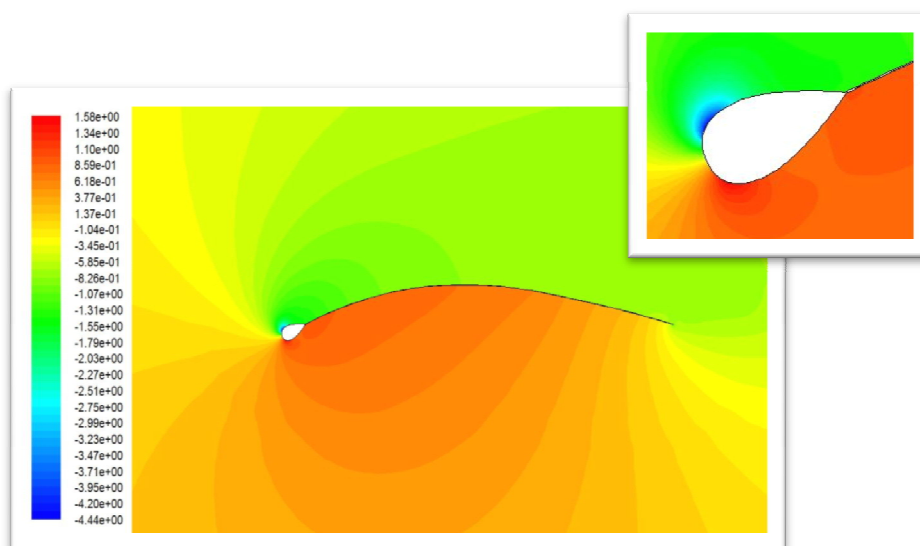


Figura 5.19 Coefficiente di pressione per il profilo alare ruotato rispetto alla direzione del vento.

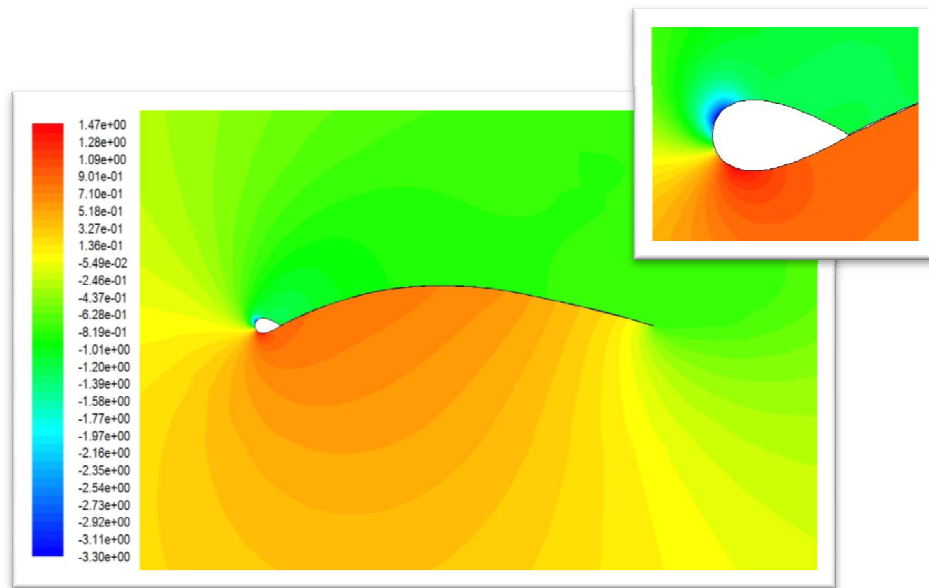


Figura 5.20 Coefficiente di pressione per il profilo alare fisso, con angolo di attacco di 25° .

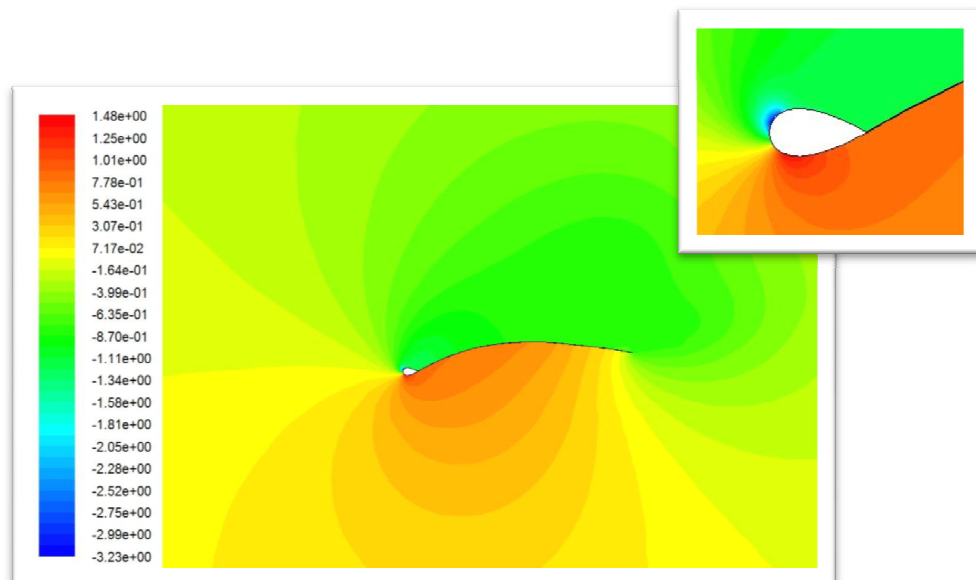


Figura 5.21 Coefficiente di pressione per il profilo alare fisso, con angolo di attacco di 30° .

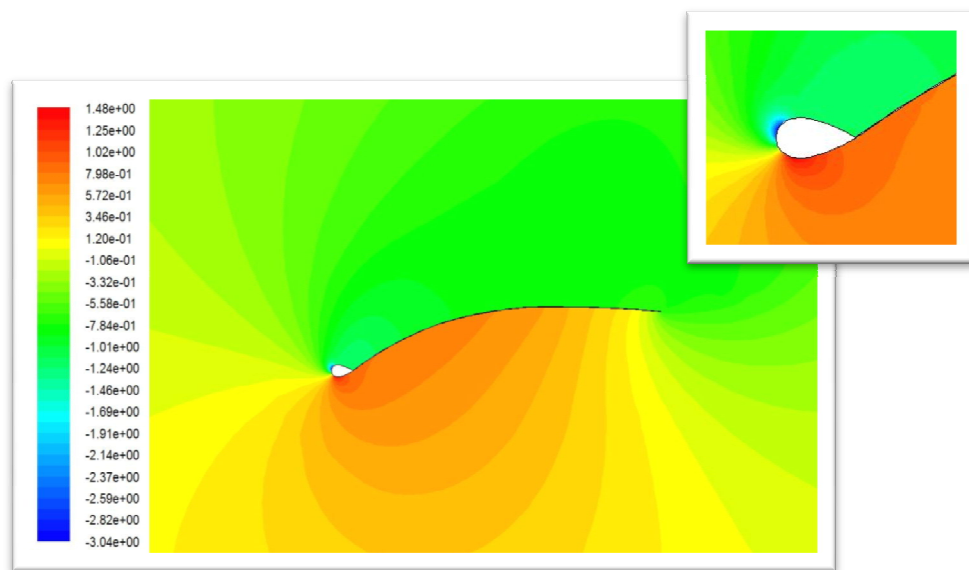


Figura 5.22 Coefficiente di pressione per il profilo alare fisso, con angolo di attacco di 35° .

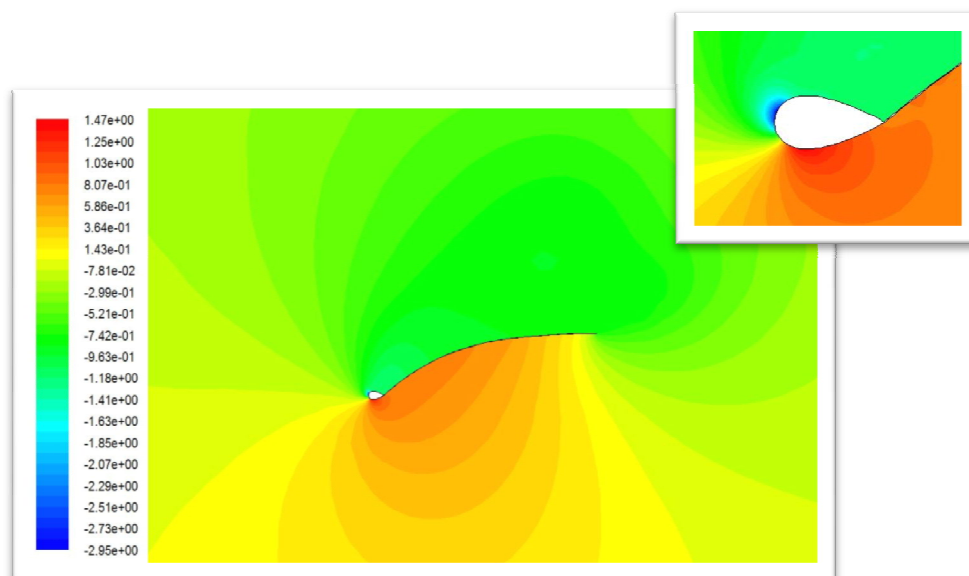


Figura 5.23 Coefficiente di pressione per il profilo alare fisso, con angolo di attacco di 40° .

5.3 Conclusioni

Lo studio fluidodinamico che è stato condotto ha permesso di definire quale tra le configurazioni studiate fosse quella che garantisse la maggior efficienza aerodinamica del sistema albero-vela.

Le simulazioni numeriche sulle differenti geometrie hanno evidenziato un miglioramento dell'efficienza mediante l'utilizzo di una forma alare ruotata nella direzione del vento in tutti gli angoli di avanzamento al vento.

Questa soluzione permette di ruotare rigidamente il sistema albero-boma-randa in modo da mantenere sempre lo stesso angolo di incidenza al vento e massimizzare l'efficienza della vela. L'aumento dell'efficienza di questa configurazione arriva fino al 73 % rispetto al profilo alare fisso e angolo di incidenza al vento di 40°.

Il profilo peggiore è risultato essere quello a forma alare fissa per il quale si sono determinati valori di efficienza più bassi di tutti gli altri profili e ad ogni angolo di avanzamento al vento.

Le differenze tra i profili circolare, ellissoidale e alare fisso non risultano essere particolarmente grandi ma, mentre per valori angolari bassi l'aumento di efficienza risulta essere limitato, per valori superiori ai 30° il vantaggio del profilo alare ruotato nella direzione del vento, rispetto a tutti gli altri profili, è estremamente elevato.

6. Analisi delle prestazioni di un armo CAT con sola randa e boma tipo wishbone, dotato di albero rotante a profilo alare

6.1 Introduzione

Tutte le vele che sono inferite su di un albero in corrispondenza del bordo di attacco vengono influenzate dalla presenza dell'albero stesso (figura 6.1).

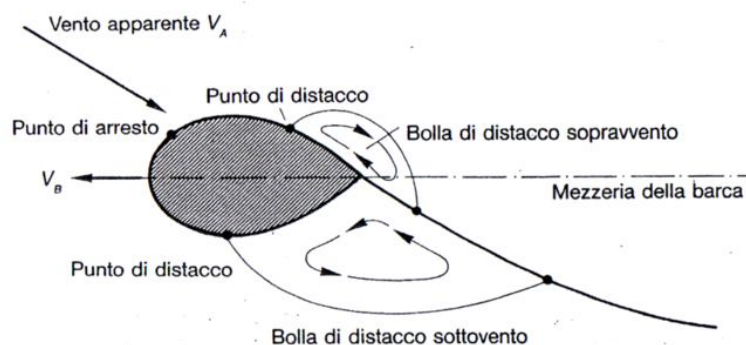


Figura 6.1 Flusso d'aria attorno all'albero e alla vela.

La figura mostra quello che succede sul lato sottovento della vela; il flusso d'aria che lambisce il lato sottovento dell'albero, a causa della curvatura dell'albero e della discontinuità geometrica introdotta dall'inferitura della vela sull'albero stesso, non riesce a "seguire" la superficie su cui scorre separandosene in corrispondenza del "punto di distacco". La stessa cosa accade in maniera meno gravosa sul lato sopravvento della vela. In ogni caso, sia sottovento che sopravvento, si creano delle bolle di distacco sedi di dissipazione di energia

cinetica in favore di formazioni di zone vorticose che fanno decadere l'efficienza della vela (Crepaz, 1990).

Vista la possibilità (verificata con alcune semplici analisi fluidodinamiche preliminari) di migliorare del 20% le prestazioni di un normale albero a sezione circolare semplicemente apponendo un fascia di materiale flessibile che "chiuda" lo spazio tra albero e vela, si è pensato di valutare le prestazioni aerodinamiche di un armo CAT con boma tipo wishbone e albero rotante a sezione alare e compararlo con un armo uguale ma dotato di albero a sezione circolare. Le fasi dello studio, come al solito, sono costituite da:

- Modellazione geometrica
- Definizione dominio di calcolo
- Creazione della mesh
- Impostazione dell'analisi
- Analisi
- Analisi dei risultati

6.2 Analisi CFD

6.2.1 Pre-Processing

La geometria della vela è stata costruita attraverso il software Rhinoceros; la geometria è quella tipica delle vele per andatura di bolina. Sulla base dei dati forniti da un velaio, si sono costruite varie sezioni trasversali della vela e si è quindi costruita la superficie tramite il comando sweep su due binari rappresentati dalle curve 1 e 2 di figura 6.2.

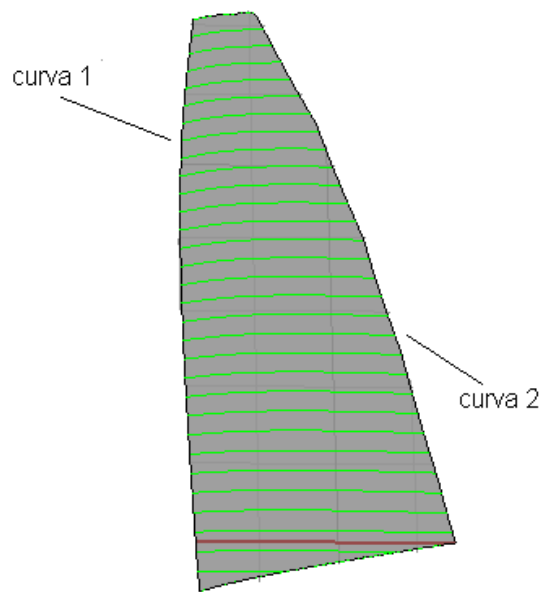


Figura 6.2 Modello CAD fornito dal velaio.

Successivamente è stato costruito l'albero a sezione circolare di diametro $D=10$ cm (figura 6.3).

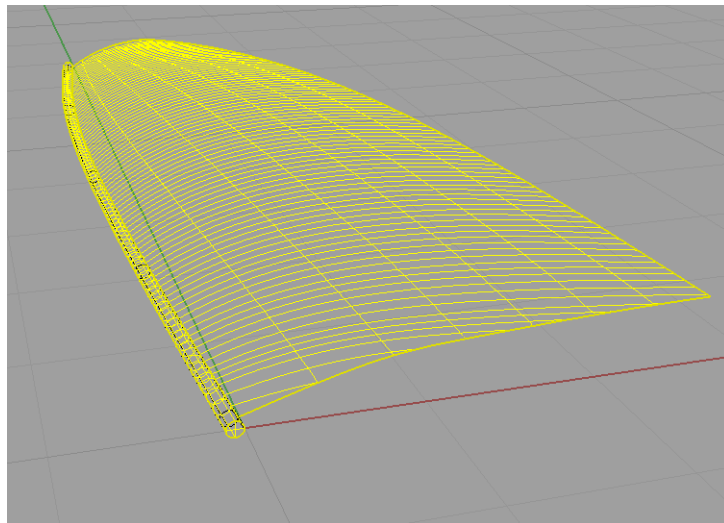


Figura 6.3 Geometria del modello con albero a sezione circolare.

Allo stesso modo è stata realizzata la configurazione con albero rotante a profilo alare realizzata una con profilo aerodinamico avente un ingombro massimo (sezione maestra) di 10 cm pari al diametro dell'albero della prima configurazione (figura 6.4).

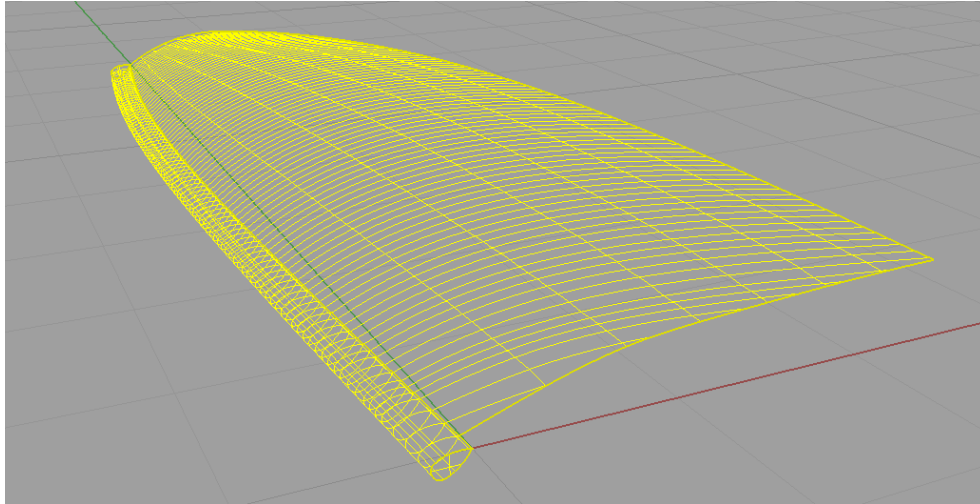


Figura 6.4 Geometria del modello con albero rotante a sezione aerodinamica.

La vela ha le seguenti caratteristiche geometriche:

- altezza randa $h = 8\text{m}$;
- corda alla base $b = 3\text{m}$;
- corda alla sommità $B = 1\text{m}$;
- superficie totale $A = 18\text{m}^2$;
- indice di figura $\Lambda = h^2/A = 3,55$;
- curvatura massima pari al rapporto freccia massima/corda = 10%.

Si sono realizzate varie configurazioni di questa geometria ruotando esclusivamente la vela di 5° , 10° e 15° lasciando fisso nella sua posizione originaria l'albero così come accade in navigazione quando si "lasca" la vela per "seguire" il vento e mantenere lo stesso angolo di incidenza di maggiore efficienza.

Nelle figure 6.6 - 6.8 è mostrata l'imbarcazione con la randa ruotata rispettivamente di 5, 10 e 15 gradi rispetto alla sua posizione originale (figura 6.5).

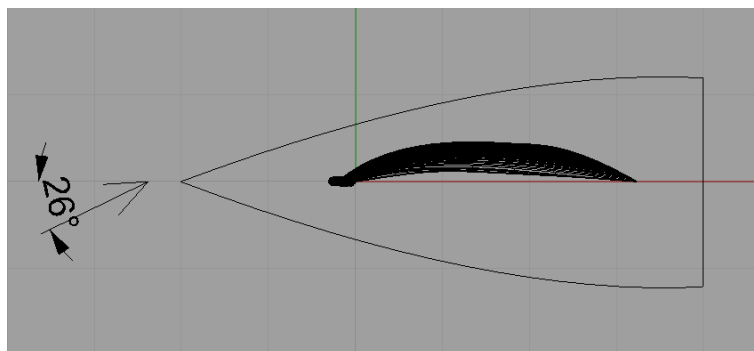


Figura 6.5 Schema dell'imbarcazione con randa in configurazione non ruotata.

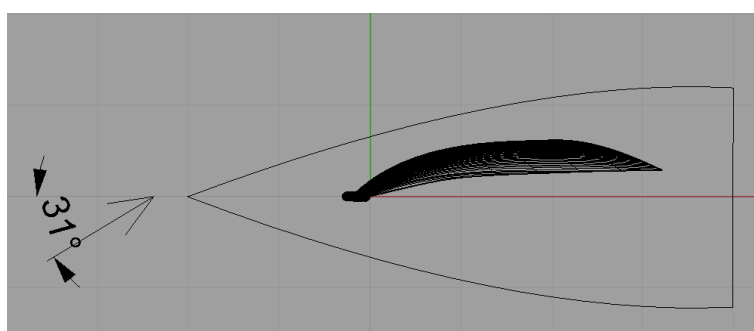


Figura 6.6 Randa ruotata di 5°.

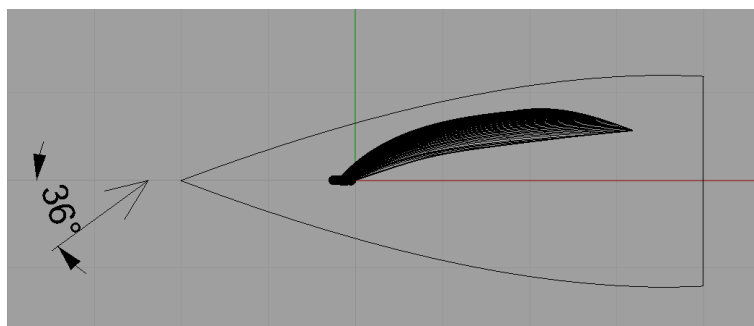


Figura 6.7 Randa ruotata di 10°.

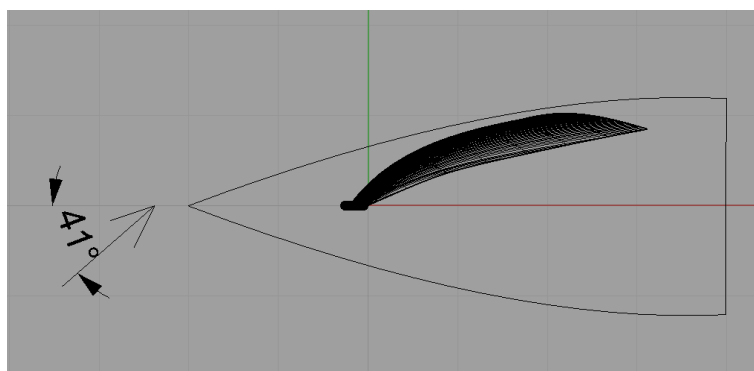


Figura 6.8 Randa ruotata di 15°.

Tutte le superfici sono state salvate nel formato neutro di esportazione IGES ed importate nel software ICEM per la costruzione delle mesh.

Per quanto riguarda la definizione del volume di controllo, nel caso in studio, si sono scelte le seguenti dimensioni: $5 L_{\text{PROFILO}}$ a prua, $9 L_{\text{PROFILO}}$ a poppa, $7 L_{\text{PROFILO}}$ di fianco e in altezza. Il dominio ottenuto è quello mostrato in figura 6.9.

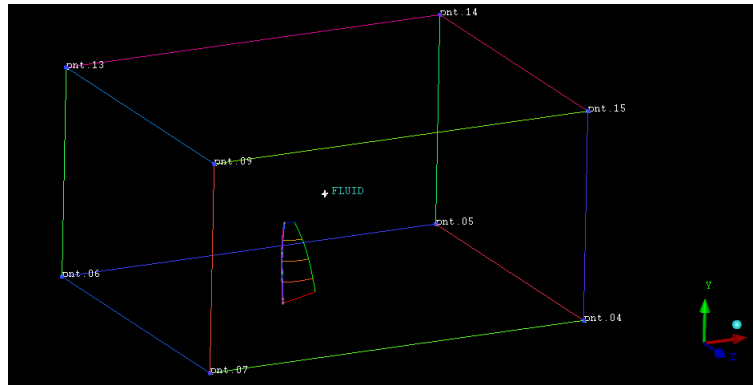


Figura 6.9 Punti e curve per la definizione del volume di controllo.

La struttura a blocchi della mesh è mostrata nelle figure 6.10 e 6.11 mentre le mesh sono mostrate nelle figure 6.12, 6.13 e 6.14.

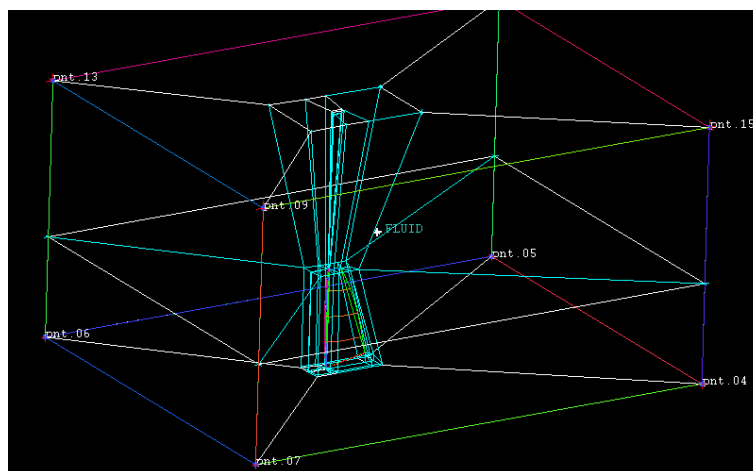


Figura 6.10 Struttura a blocchi.

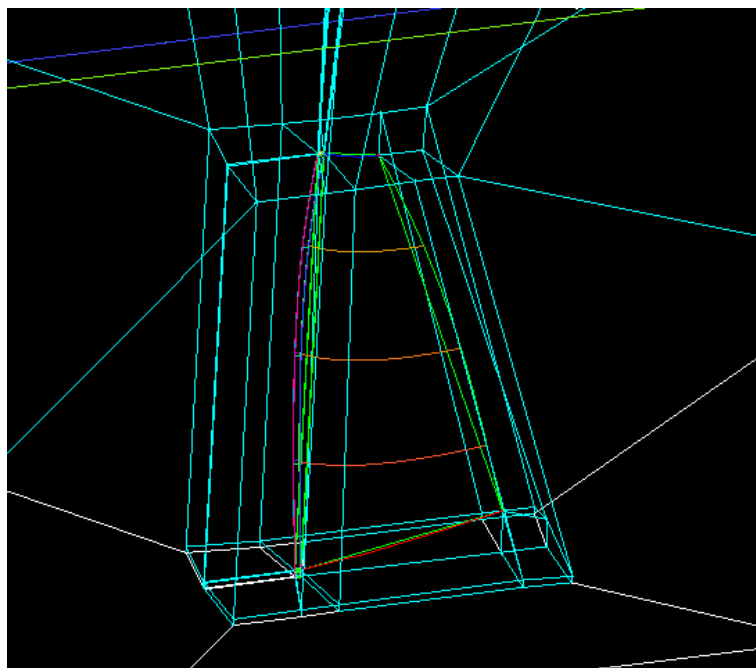


Figura 6.11 Particolare del sottovolume che delimita la randa.

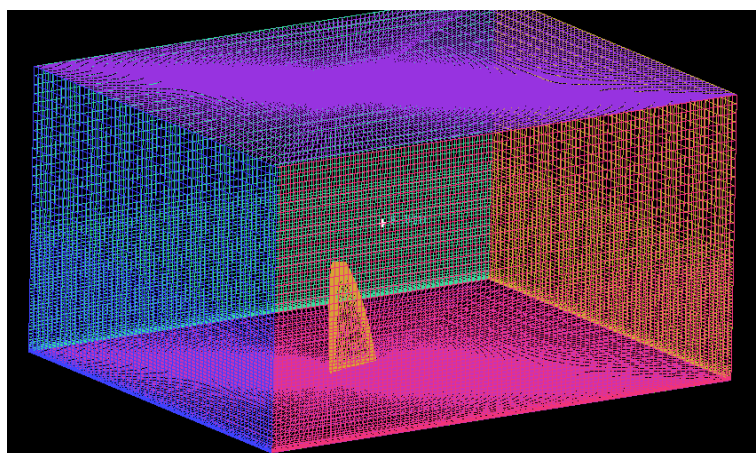


Figura 6.12 Mesh esaedrica strutturata del dominio di controllo e della vela.

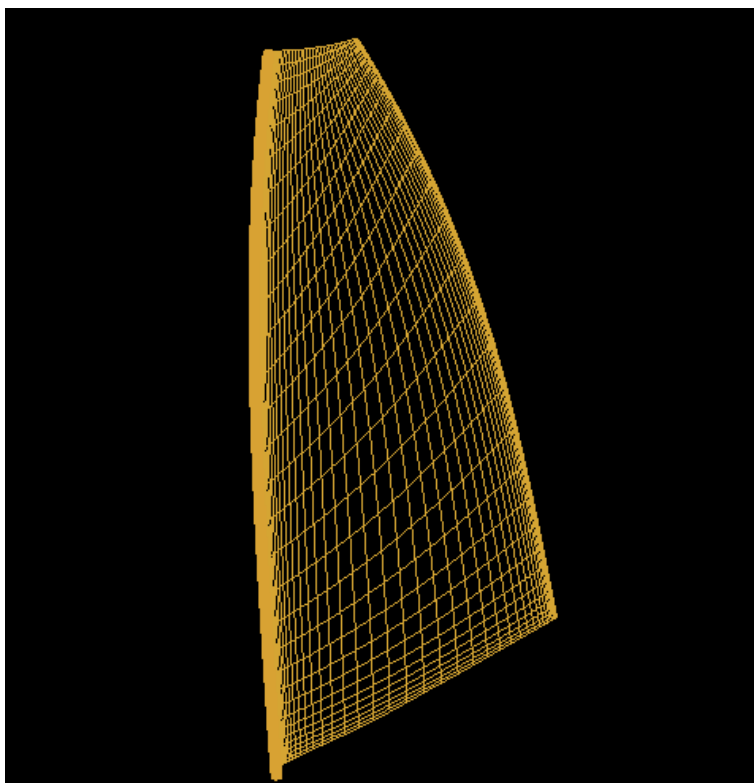


Figura 6.13 Mesh di superficie dell'albero e della vela.

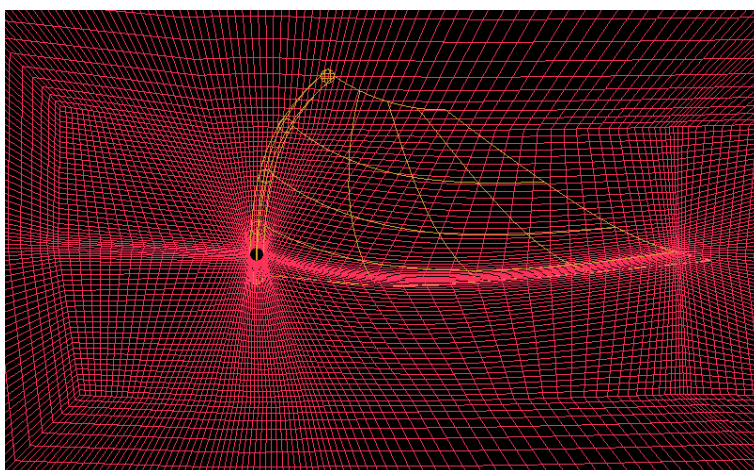


Fig 6.14 Visualizzazione della mesh su di un piano ortogonale all'albero alla quota di 4m.

Si può osservare l'elevato infittimento in prossimità delle regioni adiacenti alla vela e all'albero per meglio cogliere i gradienti di velocità e pressione all'interno dello strato limite. La mesh risulta essere costituita da 955545 nodi per tutte le configurazioni analizzate.

6.2.2 Solving

La grande varietà degli stati turbolenti nei flussi fluidi che investono le vele di un'imbarcazione pone in evidenza il fatto che non esista un singolo modello di turbolenza universalmente valido per simulare tutte le condizioni di navigazioni possibili; per questo motivo la scelta del modello di turbolenza più appropriato si rivela una delle fasi più delicate in una simulazione CFD di questo tipo (Ciortan, C., Guedes, Soares C., 2007; Hedges, K.L., Richards, P.J., Mallinson, G.D., 1996; Jackson, P.S., 1996; Lasher, William C., Sonnenmeier, James R., 2008; Maria Viola, I., 2009).

Il modello di turbolenza scelto per le simulazioni effettuate è il K- ϵ con le standard wall functions; le condizioni al contorno, in relazione alla figura 6.15 sono:

- superficie 1 e 2: velocity inlet
- superficie 3 e 4: outflow
- superficie 5 e 6: wall

La velocità a cui sono state condotte le analisi è di 7m/s.

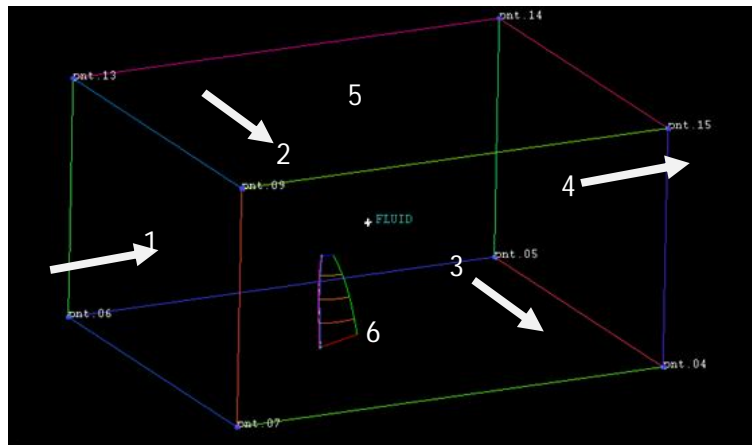


Figura 6.15 Boundary condition.

L'algoritmo di accoppiamento tra pressione e velocità scelto è il SIMPLE; per gli under-relaxation factors si sono scelti valori più conservativi di quelli predefiniti per garantire una più veloce convergenza e una maggiore stabilità del processo di calcolo. Tutti gli schemi di discretizzazione delle equazioni sono stati settati al primo ordine data l'elevata qualità delle mesh utilizzate.

A monte delle analisi definitive è stata effettuata un'analisi di sensibilità; sulla base della topologia a blocchi mostrata in figura 6.10 sono state generate tre mesh, con un numero di elementi progressivamente crescente, e su di esse sono state eseguite le analisi CFD.

La stabilità della soluzione si ottiene per un numero di nodi pari a 955545. Ciò significa che i risultati delle simulazioni con mesh che contengono un numero di elementi superiore a quello determinato non dipendono più dal numero stesso di elementi. L'analisi di sensibilità è riassunta nelle tabelle 6.1 e 6.2 e nelle figure 6.16 e 6.17.

Tabella 6.1 Analisi di sensibilità: parametro "drag".

	N° nodi	Coefficiente di drag
Soluzione 1	632450	0.2684
Soluzione 2	955545	0.3010
Soluzione 3	1354790	0.3013

Tabella 6.2 Analisi di sensibilità: parametro "lift".

	N° nodi	Coefficiente di lift
Soluzione 1	632450	1,1442
Soluzione 2	955545	1,1405
Soluzione 3	1354790	1,1401

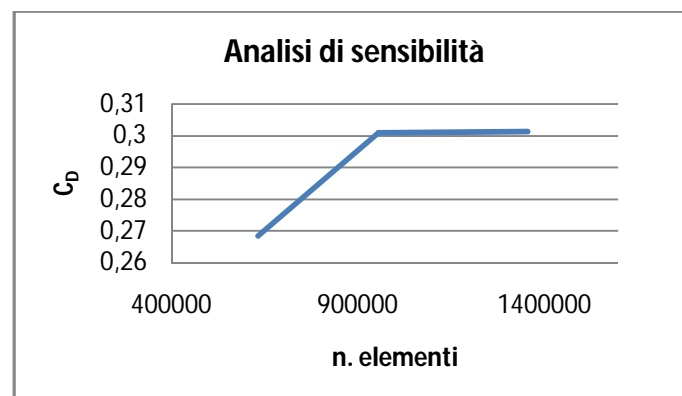


Figura 6.16 Analisi di sensibilità: drag.

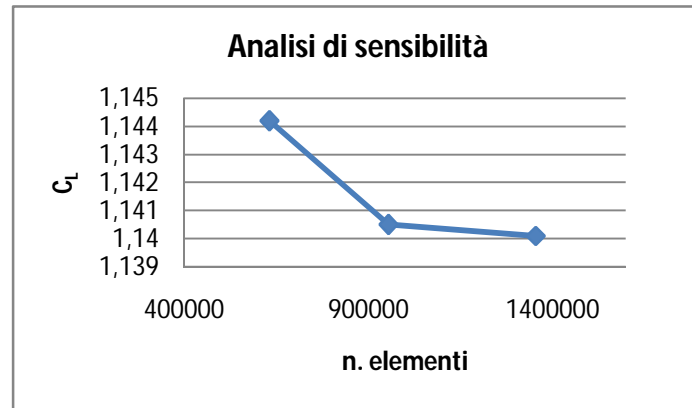


Figura 6.17 Analisi di sensibilità: lift.

Prima di effettuare un confronto sulle prestazioni aerodinamiche dei due sistemi albero-randa differenti, è stato necessario determinare quale fosse l'angolo di incidenza che fornisce il coefficiente di portanza massimo in andature di bolina.

Sulla base di ciò è stata effettuata una serie di analisi preliminari sulla geometria della vela, in configurazione non ruotata e con albero a sezione circolare, al variare dell'angolo di incidenza. Gli angoli analizzati vanno dai 14° ai 28°.

Nella figura 6.18 si possono vedere i risultati di tali analisi; l'angolo per il quale il coefficiente di portanza è maggiore è di 26°. Nella figura 6.19 è mostrato il diagramma polare costruito con i risultati delle analisi della vela analizzata.

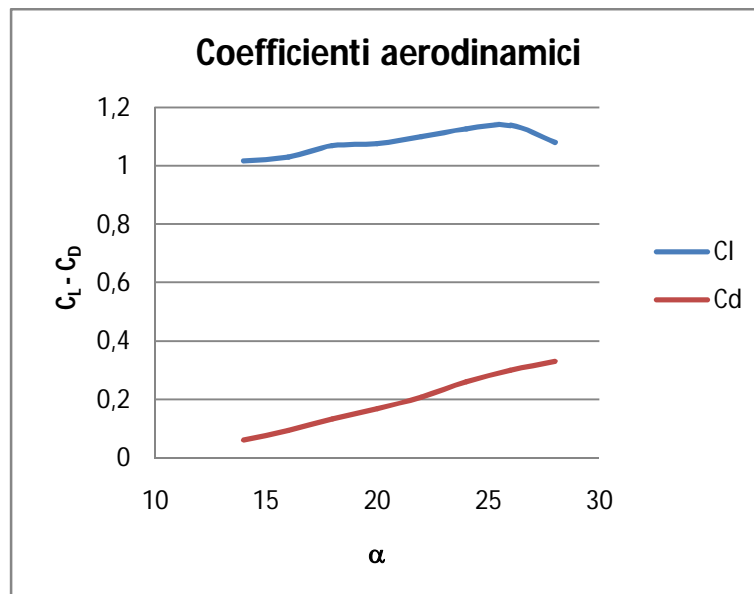


Figura 6.18 Caratteristiche aerodinamiche della vela al variare dell'incidenza.

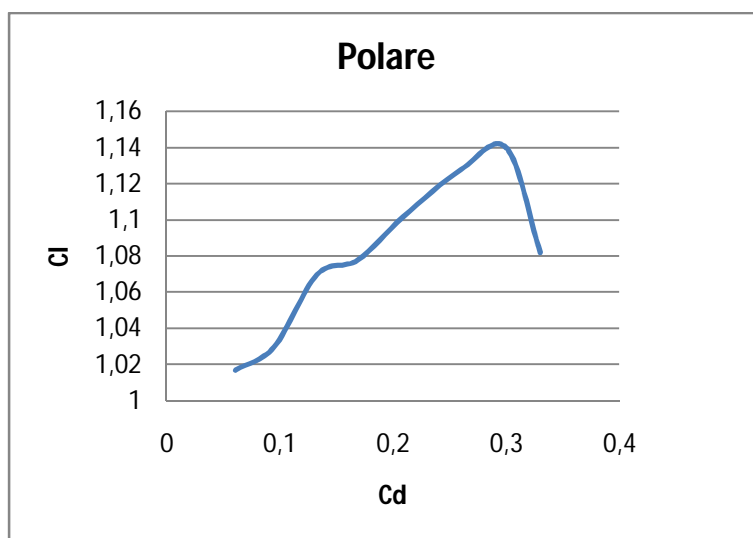


Figura 6.19 Polare della randa.

Nelle tabella 6.3 si riportano i dati ottenuti.

Tabella 6.3 Coefficienti di portanza e di resistenza al variare dell'angolo di incidenza al vento α .

α	C_l	C_D
14°	1,017	0,061
16°	1,03	0,095
18°	1,07	0,133
20°	1,078	0,169
22°	1,102	0,209
24°	1,128	0,26
26°	1,14	0,3
28°	1,082	0,33

Le analisi successive per il confronto dei due differenti sistemi albero-randa sono state effettuate partendo da un angolo di incidenza di 26° variando l'andatura, da bolina stretta a bolina larga con step di 5°.

Mentre per l'albero a sezione circolare si sono analizzate quattro diverse disposizioni della vela rispetto all'albero, variando sia la geometria che la mesh ad ogni rotazione della vela, per

la seconda configurazione è bastato considerare una sola geometria, una sola mesh e quindi una sola analisi visto che l'angolo relativo tra vento e sistema albero-vela resta invariato al variare dell'andatura.

6.2.3 Post-Processing

Nelle tabelle 6.4 e 6.5 si riportano i valori ottenuti dalle analisi effettuate sulle due configurazioni. Gli stessi risultati sono anche mostrati nelle figure 6.20 e 6.21.

Tabella 6.4 Coefficienti aerodinamici per l'albero a sezione circolare.

Albero a sezione circolare	α (°)	C_l	C_D	η (C_l/C_D)
	26	1,14	0,3	3,8
	31	1,137	0,311	3,65
	36	1,128	0,315	3,58
	41	1,114	0,317	3,51

Tabella 6.5 Coefficienti aerodinamici per l'albero rotante a sezione alare.

Albero a sezione circolare	α (°)	C_l	C_D	η (C_l/C_D)
	26	1,25	0,26	4,80
	31	1,25	0,26	4,80
	36	1,25	0,26	4,80
	41	1,25	0,26	4,80

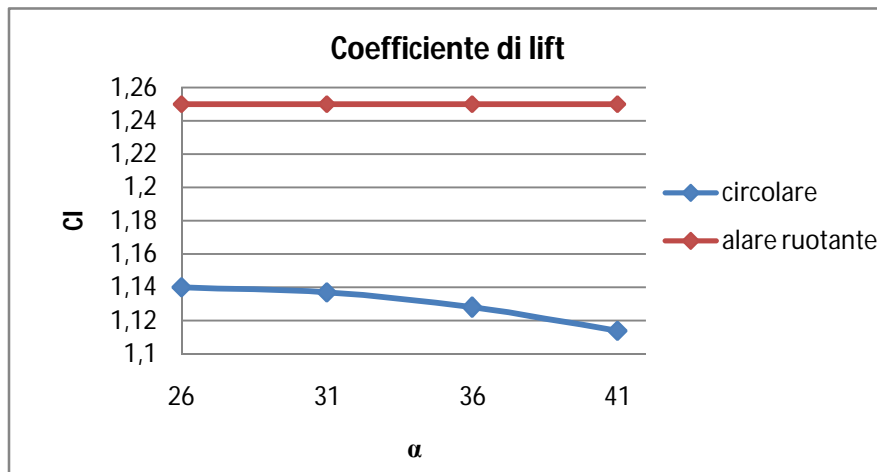


Figura 6.20 Coefficienti di portanza al variare dell'angolo di incidenza al vento.

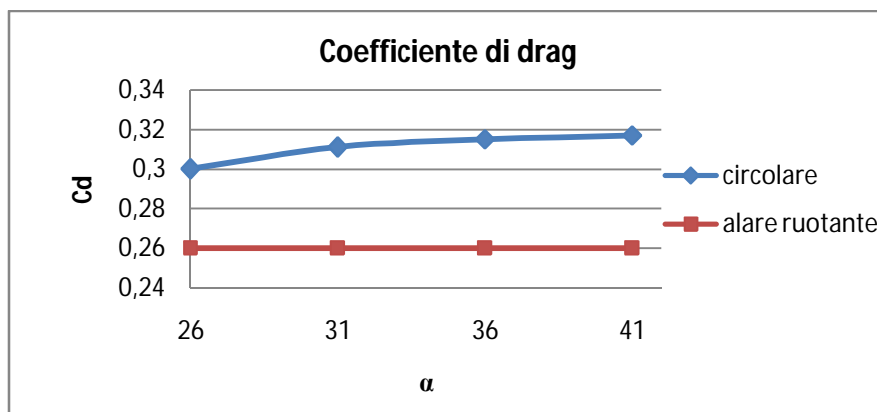


Figura 6.21 Coefficienti di resistenza al variare dell'angolo di incidenza al vento.

Nel grafico successivo (figura 6.22) è mostrata l'efficienza dei due sistemi albero-randa al variare dell'angolo di incidenza al vento della vela.

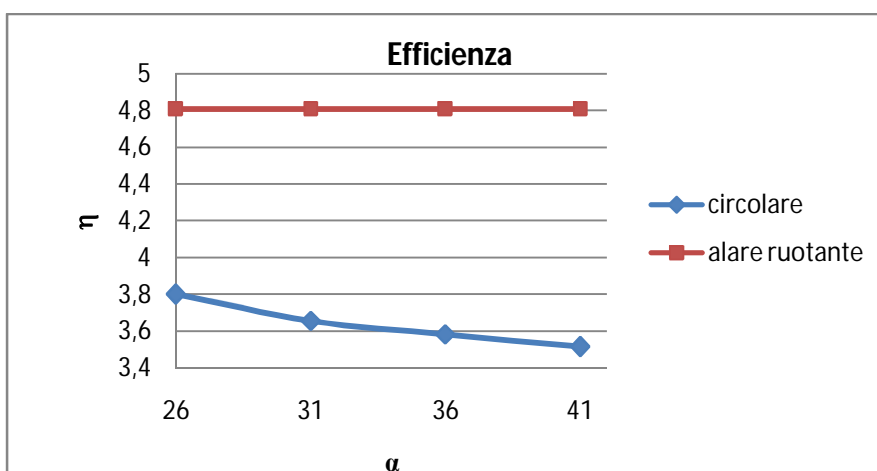


Figura 6.28 Efficienza del sistema albero-vela al variare dell'angolo di incidenza al vento.

Nelle figure 6.22 e 6.23 sono mostrate le distribuzioni del coefficiente di pressione attorno alla vela per la configurazione con albero circolare per angoli di incidenza al vento di 26 e 41 gradi.

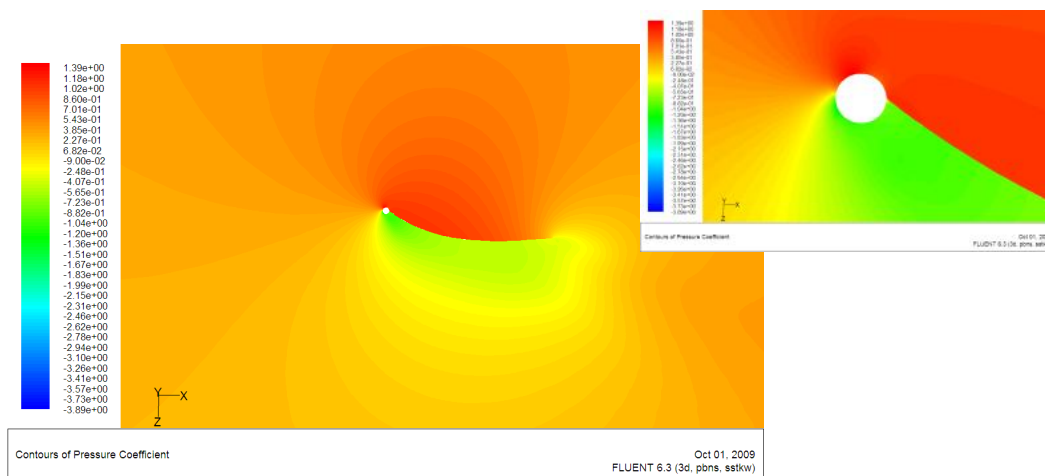


Figura 6.22 Coefficiente di pressione su un piano orizzontale alla quota di 4m per albero circolare e $\alpha = 26^\circ$.

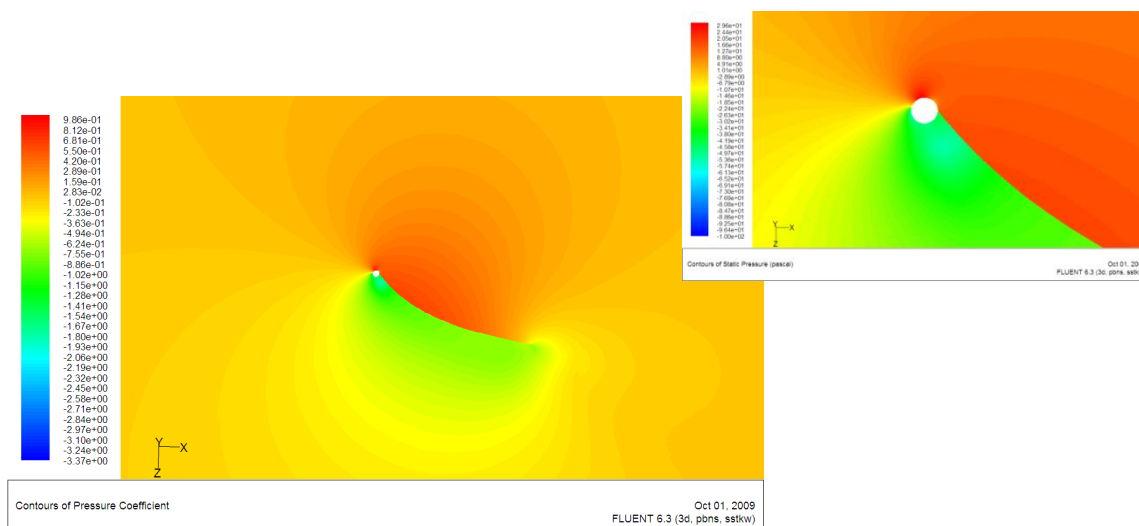


Figura 6.23 Coefficiente di pressione su un piano orizzontale alla quota di 4m per albero circolare e $\alpha = 41^\circ$.

Di seguito (figura 6.24) si riporta un' immagine della distribuzione del coefficiente di pressione per la configurazione con albero rotante a sezione alare.

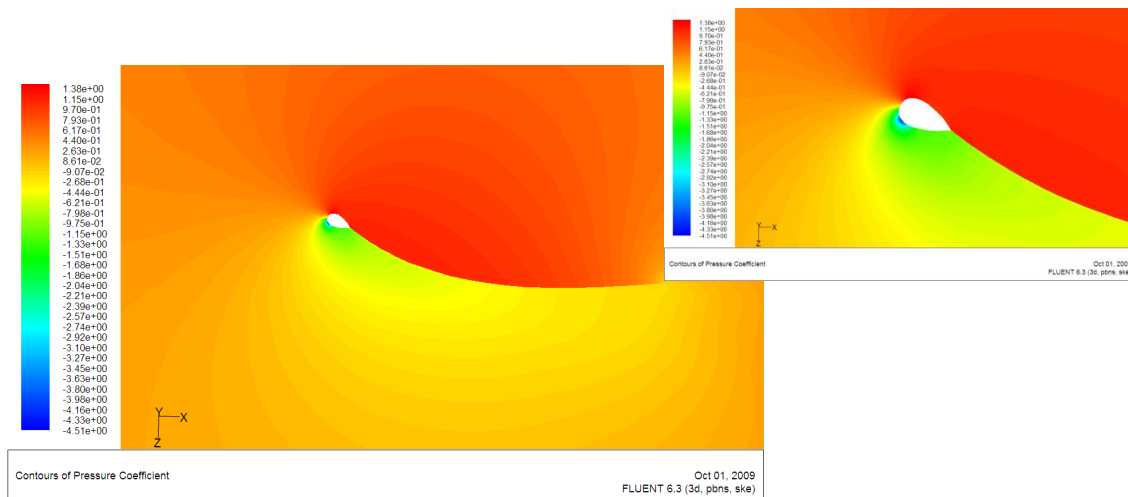


Figura 6.24 Coefficiente di pressione su un piano orizzontale alla quota di 4m per albero rotante a sezione alare e $\alpha = 41^\circ$.

Nelle figure successive (figure 6.25 e 6.26) è mostrata la distribuzione dei vettori velocità e la distribuzione dell'energia cinetica turbolenta per il sistema con albero circolare su un piano orizzontale posto alla quota di 4 m di altezza.

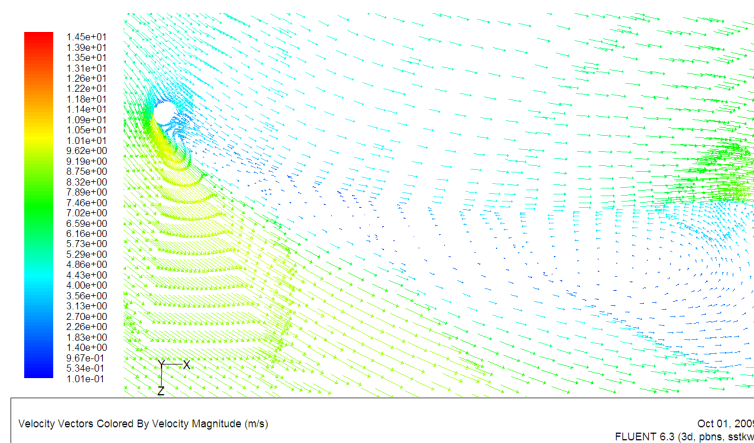


Figura 6.25 Vettori di velocità su piano di taglio orizzontale per la configurazione albero circolare fisso $\alpha = 26^\circ$.

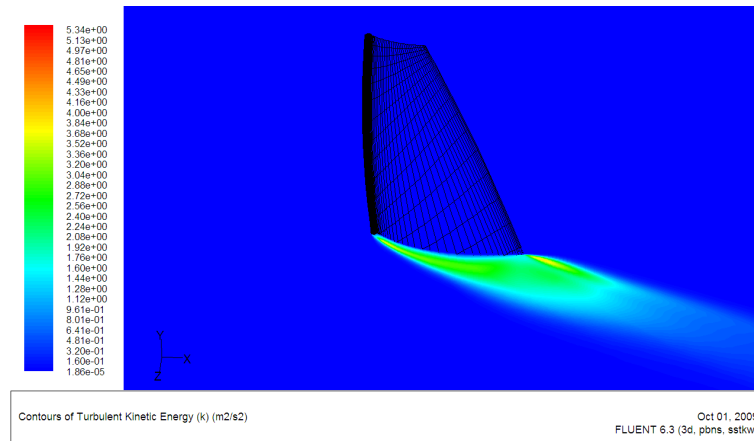


Figura 6.26 Energia cinetica turbolenta per il sistema con albero circolare su un piano orizzontale posto alla quota di 4 m di altezza.

Per meglio evidenziare la differenza di prestazioni fra una configurazione e l'altra si è determinato l'incremento percentuale di efficienza del sistema albero rotante a sezione alare rispetto a quello con albero a sezione circolare (tabella 6.6).

Tabella 6.6 Incremento percentuale di efficienza del profilo aerodinamico ruotante.

α (°)	Incremento percentuale di efficienza
26°	26,5%
31°	31,5%
36°	34,2%
41°	36,8%

La bontà della configurazione con albero rotante a sezione alare è dimostrata oltre che dai coefficienti anche dalle forze di resistenza e portanza. I risultati ottenuti si riportano nelle tabelle 6.7 e 6.8; vengono riportate anche le forze propulsiva e laterale per entrambi i sistemi.

Tabella 6.7 Forze aerodinamiche per la configurazione con albero a profilo circolare.

ALBERO A PROFILO CIRCOLARE				
α (°)	Portanza (N)	Resistenza (N)	Forza propulsiva (N)	Forza di sbandamento (N)
26	686	184	134	689
31	681	186	190	680
36	675	187,7	245	657
41	668	189	295	629

Tabella 6.8 Forze aerodinamiche per la configurazione con albero rotante a profilo alare.

ALBERO ROTANTE A PROFILO ALARE				
α (°)	Portanza (N)	Resistenza (N)	Forza propulsiva (N)	Forza di sbandamento (N)
26	749	158	185	743
31	749	158	250	723
36	749	158	312	687
41	749	158	372	668

6.3 Conclusioni

In generale la presenza dell'albero ha effetti negativi sia sulla portanza che sulla resistenza dell'armo di una barca; tali inconvenienti sono difficilmente evitabili soprattutto se l'albero è fisso e non alcuna possibilità di orientarsi rispetto al vento.

Nel caso in cui, invece, possa essere utilizzato un albero a profilo alare capace di ruotare disponendosi in maniera opportuna rispetto al vento, si può ottenere un notevole miglioramento dell'efficienza aerodinamica di tutto l'armo rispetto ad una configurazione classica.

Il presente studio ha potuto quantificare l'entità di tale miglioramento mostrando un aumento del coefficiente di portanza fra una configurazione e l'altra pari al 9,6% per un angolo di incidenza al vento di 41°. Per lo stesso angolo l'incremento di efficienza per la configurazione con albero a profilo alare è del 36,8%.

Valori significativi sono anche quelli determinati per le forze propulsive e di sbandamento; a parità di angolo di incidenza la configurazione ad albero rotante con profilo alare mostra una forza propulsiva maggiore di quella generata dall'albero a sezione circolare e tale differenza si incrementa all'aumentare dell'angolo di incidenza al vento fino ad arrivare al 26% per un angolo di 41°. Tale incremento è giustificato proprio dalla rotazione dell'albero che riduce il disturbo che esso stesso induce sulla vela.

È necessario ricordare che un albero rotante generalmente non è insartiato e la mancanza del sartame rende l'attrezzatura più leggera e aerodinamicamente più vantaggiosa pur comportando l'uso di materiali più resistenti. Con tale configurazione, infatti, l'albero che non ha cavi di sostegno viene spinto dalla forza del vento a flettersi di più subendo una maggiore compressione.

Mentre è vero che un albero insartiato è indubbiamente meno sollecitato a flessione perché sorretto dalle sartie e dagli stralli risultando sollecitato prevalentemente a compressione, un albero non insartiato si comporta come una trave incastrata sollecitata da un carico che tende sia a fletterlo che a sollecitarlo a compressione e a trazione.

È altresì vero che un albero di questo tipo, al contrario di uno insartiato, non è soggetto a torsione vista la sua capacità di poter ruotare intorno al suo asse longitudinale.

Altro svantaggio relativo all'utilizzo di un albero rotante è la difficoltà introdotta dal sistema che ne permette la rotazione. Sarà infatti necessario prevedere un cuscinetto posizionato alla base dell'albero e uno all'altezza della coperta che comporteranno anche un incremento in peso di tutto l'armo.

7. VPP e integrazione CFD-VPP

Dall'esperienza maturata in ambito CFD è venuta l'idea di utilizzare questo potente strumento di determinazione di forze generate da corpi in moto all'interno di fluidi come fonte di dati per un VPP, acronimo di Velocity Prediction Program, un programma, cioè, in grado di valutare le prestazioni di uno yacht (Korpus, R., 2007; Jacquin, E. e altri, 2005).

Il VPP, di cui parlerò diffusamente in seguito, è come una potente calcolatrice che prende alcuni input che riguardano la barca inseriti dall'utente, ne impone altri e, con un processo iterativo permette la predizione delle prestazioni di un'imbarcazione e la creazione di grafici (come ad esempio i diagrammi polari) e tabelle che permettono di leggere in modo semplice ed intuitivo la velocità che essa dovrebbe avere con le condizioni di vento presenti.

Il diagramma polare delle velocità consiste nella massima velocità teorica dell'imbarcazione a varie intensità di vento reale e angoli di rotta, insieme alle associate VMG (velocities made good) per risalire e scendere il vento (Schlageter E.C.; 1993; Van Oossanen P., 1993).

I tattici utilizzano i diagrammi polari per determinare se la loro imbarcazione stia o meno veleggiando alla sua massima velocità o VMG, e i progettisti navali la usano per una vasta quantità di fini; principalmente per avere una stima delle prestazioni dei loro nuovi progetti, o per confrontare cambiamenti (deriva, timone, dimensioni dell'attrezzatura, ecc...) in un progetto.

I valori di input da immettere per la definizione dell'imbarcazione includono la superficie velica, le dimensioni dell'attrezzatura, le caratteristiche dello scafo (lunghezza fuori tutto, lunghezza al galleggiamento, baglio, momento raddrizzante, ecc...), coefficienti adimensionali di forma per lo scafo, deriva, bulbo e dimensioni del timone, membri dell'equipaggio e loro posizione durante la navigazione ed infine i range della velocità del vento reale e dei suoi angoli.

Il modello aerodinamico del VPP contiene dati sperimentali per le vele e la regolazione dell'attrezzatura, e viene utilizzato per determinare le forze ed i momenti aerodinamici. In modo simile, il modello idrodinamico contiene dati sperimentali per lo scafo e le appendici, e viene utilizzato per determinare le forze ed i momenti idrodinamici. Infine, la subroutine risolutiva è un complesso algoritmo in grado di ottimizzare iterativamente le variabili fin

quando il sistema di equazioni è risolto. Il modello aerodinamico viene applicato per primo. Il valore iniziale della velocità del vento reale e del suo angolo vengono utilizzati come condizione iniziale, mentre il programma fissa arbitrariamente le variabili indipendenti. Utilizzando nozioni base di trigonometria, la velocità e l'angolo del vento apparente possono essere calcolati; utilizzando la velocità e l'angolo del vento apparente, possono essere determinate la configurazione delle vele e le forze aerodinamiche. Infine, utilizzando alcune delle variabili e la geometria dell'attrezzatura, dalle forze aerodinamiche delle vele si possono ottenere la forza nella direzione del moto (F_T), la forza laterale sbandante (F_S), ed il momento aerodinamico sbandante (M_H). Il modello idrodinamico viene applicato successivamente. Prima di tutto, l'angolo di scarroccio viene calcolato a partire dalla forza laterale idrodinamica (F_S), che è uguale alla forza aerodinamica laterale (F_H). Successivamente, utilizzando un modello idrodinamico a regressione come la Delft Series, vengono calcolati il momento raddrizzante idrodinamico, la resistenza dello scafo e la resistenza delle appendici. Le varie componenti di resistenza vengono poi sommate per ottenere la resistenza totale (F_D) ed i vari momenti raddrizzanti (idrostatico, idrodinamico e dell'equipaggio) vengono combinati per ottenere il momento raddrizzante totale (M_R). Nella subroutine risolutiva, le forze aerodinamiche (F_T , M_H) vengono confrontate con le forze idrodinamiche (F_S , M_R) per trovare l'equilibrio dell'imbarcazione. Se le due equazioni non possono essere risolte contemporaneamente, la subroutine modificherà sistematicamente le variabili (che richiedono l'aggiornamento delle forze aero/idrodinamiche) fintanto che le equazioni non vengano soddisfatte. Questo in genere coinvolge in lungo processo iterativo, in cui la modifica di una variabile richiede conseguenti modifiche alle altre variabili. Quando forze e momenti sono in equilibrio per le condizioni di vento date, il risultato viene salvato e la successiva combinazione di velocità e angolo del vento viene inizializzata. Il programma termina quando ha verificato tutte le condizioni di vento inserite dall'utente. Gli output, come già detto, vengono raggruppati dal programma ed organizzati in tabelle, grafici e figure (Chaughton, Wellicome, Shenoi, 1998; ORC VPP Documentation, 2009).

Molti VPP standard fanno un buon lavoro nel predire la velocità teorica dell'imbarcazione e gli angoli di scarroccio per le tipiche imbarcazioni cruiser/racer semidisciplanti.

I generici modelli aero/idrodinamici utilizzati nel calcolo sono abbastanza "larghi" per poter prendere in considerazione molte forme di scafi, sebbene a tale "larghezza" segua una perdita in precisione.

Le polari vengono calcolate in condizioni ideali: le vele sono regolate perfettamente, la carena e le appendici sono pulite, il vento è stabile, e vengono fatte molte ipotesi in modo da far lavorare il programma velocemente.

Nel mondo reale le vele si stirano, la carena si sporca, le derive si scheggiano, il peso si sposta e l'imbarcazione si flette; in altre parole, l'accuratezza del VPP dipende da quanto la barca e le vele corrispondano alle condizioni "ideali" utilizzate nelle prove sperimentali.

In secondo luogo, il VPP non tiene generalmente conto del "surfare" della barca sulle onde; di conseguenza, i risultati sulla velocità di risalita del vento possono essere sovrastimati e quelle di discesa sottostimati.

Da quanto detto, in special modo in relazione al funzionamento dei modelli aerodinamici ed idrodinamici, ne deriva che il limite evidente di un VPP è quello di non analizzare la "nostra" barca, ma una barca ad essa simile; il nostro scafo potrà essere simile a quello "tipo" individuato nelle serie sistematiche mediante l'introduzione dei parametri che "descrivono" la sua forma ma di certo non potrà essere esattamente quello che vogliamo analizzare. Lo stesso vale per il piano velico e le appendici; anche in questo caso la forma in pianta della vela, del timone e della deriva vengono soltanto ricostruite dal VPP mediante i parametri da noi introdotti ma tale forma non sarà la stessa di quella reale.

L'errore commesso può essere considerevole soprattutto se il nostro scafo ha dimensioni e forma che generano un comportamento differente (planante/dislocante) rispetto a quelli oggetto di studio per la stesura delle serie sistematiche. Altro limite sta nel fatto che più la barca è piccola e più l'assetto e il peso dell'equipaggio influiscono sulle forze agenti sullo scafo ed in ultima analisi sulle sue prestazioni.

Di certo lo studio CFD del "nostro" scafo, delle "nostre" vele e delle "nostre" appendici permettono di ottenere risultati più attendibili malgrado l'errore che anche le analisi fluidodinamiche commettono.

I VPP disponibili sono molti tra cui alcuni commerciali (IMS, WinDesign, AeroHydro, Span, PCSail), alcuni secretati ed utilizzati per le regole di rating (IRC, Americap II) ed altri proprietari che sono utilizzati esclusivamente dalle case di progettazione.

8. Case Study: Maribelle

Il caso studio preso in considerazione per mostrare l'integrazione di metodi numerici per la determinazione delle forze agenti su scafo, vele ed appendici in luogo di quelle determinate mediante serie sistematiche e modelli teorici ha come oggetto una piccola imbarcazione innovativa da poco brevettata da Francesco Belvisi ed in fase di costruzione.

Essa è costituita da uno scafo in vetroresina con dei tubolari (tipo gommone) applicati sulla falchetta e da un armo cat con sola randa e boma tipo wishbone.

Sarà semplice da utilizzare e molto sicura grazie alla presenza dei tubolari.

La particolarità dell'imbarcazione e la sua sostanziale diversità rispetto ad altre barche di dimensioni simili rende l'implementazione delle analisi CFD nel software VPP molto utile per una più corretta predizione delle prestazioni della barca.

8.1 La barca a vela

8.1.1 Le carene

È estremamente difficile tentare di dare una descrizione delle forme scafo adottate nelle imbarcazioni a vela, in quanto la storia e l'evoluzione dello yacht a vela ha visto tante e tali diverse tipologie che una semplice schematizzazione non è impresa semplice.

Comunemente lo scafo risulta essere costituito da due parti simmetriche rispetto ad un piano verticale, nel senso della lunghezza, chiamato piano di simmetria longitudinale. Il piano di galleggiamento suddivide poi lo scafo in due parti: di esse, quella emersa è definita opera morta e, quella immersa, opera viva o carena (Fossati, F., Diana, G., 2004; Garrett, R., 1990).

La geometria di uno scafo è descritta graficamente per mezzo di un insieme di linee di disegno costituenti il cosiddetto piano di costruzione (Mancuso, A., 2006). Tali linee consistono nella

proiezione delle intersezioni dello scafo con una serie di piani mutuamente ortogonali ed opportunamente distanziati fra loro nelle tre dimensioni (figura 8.1).

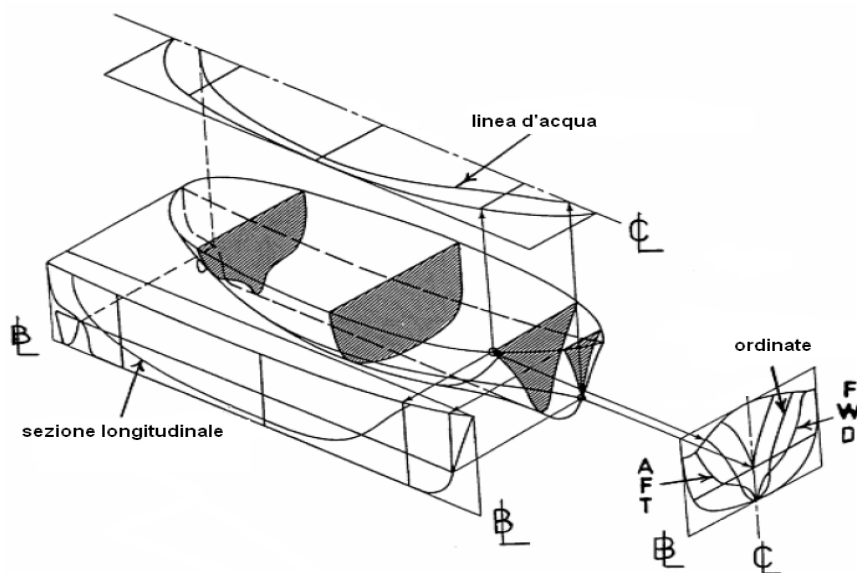


Figura 8.1 Piani di riferimento.

Di seguito si riporta una lista (anche se non completa) dei principali parametri geometrici dello scafo di una barca indicate nelle figure 8.2 e 8.3.

- L_{OA} - lunghezza tutto fuori: è la distanza misurata tra i punti estremi (emersi o immersi) dello scafo, esclusi elementi aggiuntivi;
- L_{WL} - lunghezza al galleggiamento: lunghezza dello scafo misurata al piano di galleggiamento e riferita alla condizione di pieno carico. Essa si differenzia dalla lunghezza al galleggiamento di progetto;
- B_{MAX} - larghezza massima: larghezza massima dello scafo;
- B_{WL} - larghezza al galleggiamento: larghezza al galleggiamento della sezione maestra;
- T_{MAX} - immersione massima: massima immersione dell'imbarcazione;
- T_C - immersione della carena: massima immersione della carena senza considerare le appendici;

- T_M - immersione media: distanza tra la linea di sottochiglia e la traccia del piano di galleggiamento valutate alle estremità di prua e di poppa.

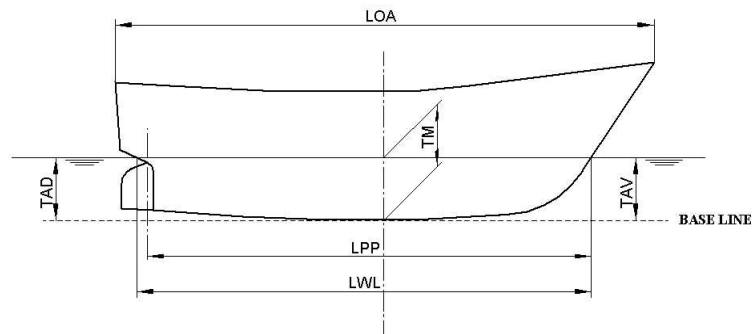


Figura 8.2 Dimensioni principali di uno scafo.

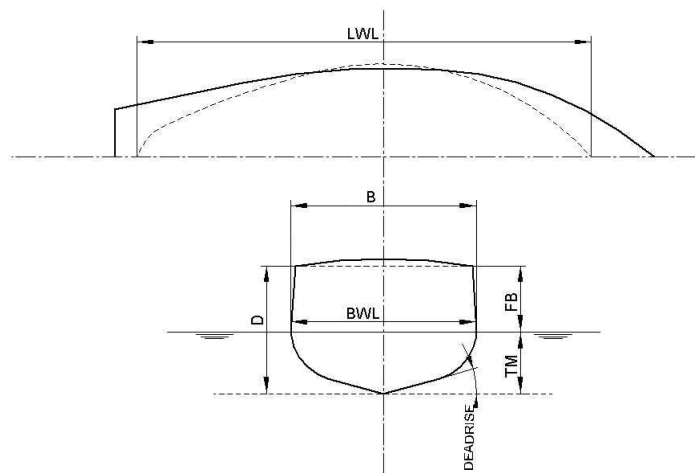


Figura 8.3 Dimensioni principali di uno scafo.

Di notevole importanza sono il volume di carena, che è il volume compreso tra il piano di galleggiamento e la superficie immersa dello scafo, e il dislocamento, che è in generale il peso dell'imbarcazione.

I coefficienti di finezza sono rapporti tra alcune dimensioni geometriche dello scafo che permettono di stabilire la pienezza delle forme; essi intervengono nei calcoli di progetto influenzando sia la statica che la dinamica della nave.

I coefficienti comunemente utilizzati sono:

- il coefficiente del piano di galleggiamento C_{WP} , che si ottiene dal rapporto tra l'area della figura di galleggiamento A_{WP} e l'area del rettangolo avente come lati la lunghezza e la larghezza al galleggiamento, ovvero:

$$C_{WP} = \frac{A_{WP}}{L_{WL} \cdot L_{WL}}$$

- il coefficiente di block C_B , che è dato dal rapporto tra il volume di carena V e quello del parallelepipedo avente per lati la lunghezza L_{WL} , la larghezza B_{WL} e l'immersione media T_M :

$$C_B = \frac{V}{L_{WL} \cdot L_{WL} \cdot T_M}$$

- il coefficiente della sezione maestra C_x , dato dal rapporto tra l'area della sezione maestra immersa e quella del rettangolo, avente per lati la larghezza al galleggiamento B_{WL} e l'immersione media T_M :

$$C_x = \frac{A_x}{B_{WL} \cdot T_M}$$

- il coefficiente prismatico C_P , che è costituito dal rapporto tra il volume di carena V ed il volume del cilindro avente, per sezione retta, la sezione maestra immersa e, per lunghezza, quella al galleggiamento L_{WL} :

$$C_P = \frac{V}{A_x \cdot L_{WL}}$$

I coefficienti di finezza vengono riferiti ad un determinato dislocamento, poiché l'immersione, e di conseguenza la lunghezza L_{WL} , la larghezza B_{WL} e la figura di galleggiamento A_{WP} , variano al variare del peso della barca.

La stretta correlazione tra i coefficienti di finezza e le forme della nave consente di effettuare utili valutazioni, non solo sulle qualità idrodinamiche di una carena, ma anche, sulla capacità di carico. Ad esempio, un coefficiente prismatico C_p relativamente elevato, è indice di un'uniforme distribuzione dei volumi nel senso della lunghezza della barca.

L'*opera viva*, cioè la parte della barca che si trova immersa, è costituita anche dalle cosiddette appendici:

- il timone, mezzo di governo indispensabile per condurre l'imbarcazione e fondamentale per il funzionamento sinergico dell'insieme barca, vento ed acqua;
- la deriva, o chiglia, è un'appendice simile ad un'ala collocata perpendicolarmente nella parte più bassa dello scafo di una barca a vela, che ha la funzione di equilibrare le forze messe in gioco dal vento sulle vele che tendono a "scarrocciare" la barca (spostamento laterale della barca); essa può essere mobile, ovvero retraibile (parzialmente o completamente) all'interno dell'imbarcazione.

Le carene si dividono in due grandi categorie: quelle "dislocanti", cioè quelle il cui sostentamento dinamico è dato completamente dalla spinta idrostatica, e quelle "plananti", il cui sostentamento dinamico, funzione della velocità, è dato per la maggior parte dalla spinta dinamica, che si genera sul fondo per effetto dell'inclinazione dello stesso con l'acqua, e per la minima parte rimanente, dalla spinta idrostatica.

Queste due forme di carena soddisfano due modi diversi di andare per mare, uno adatto alle velocità moderate e l'altro adatto alle velocità elevate.

Molte volte, per necessità operative, si chiede una velocità che, relativamente alla lunghezza e al dislocamento del mezzo, condiziona le scelte progettuali; a questo punto saranno l'ingombro dell'allestimento, il dislocamento e la velocità a determinare la scelta di una carena ibrida o forzata che sarà una via di mezzo tra una dislocante ed una planante. Questa carena sarà una carena semidislocante o semiplanante.

La carena semidislocante, di cui è mostrato un piano di costruzione nella figura 8.4, deriva da una carena tonda; avendo una velocità relativa elevata, avrà una formazione ondosa tale da

avere un forte appoppamento. Quindi si deve modificare il gioco di pressioni e depressioni che si crea sotto la carena a scapito della resistenza.

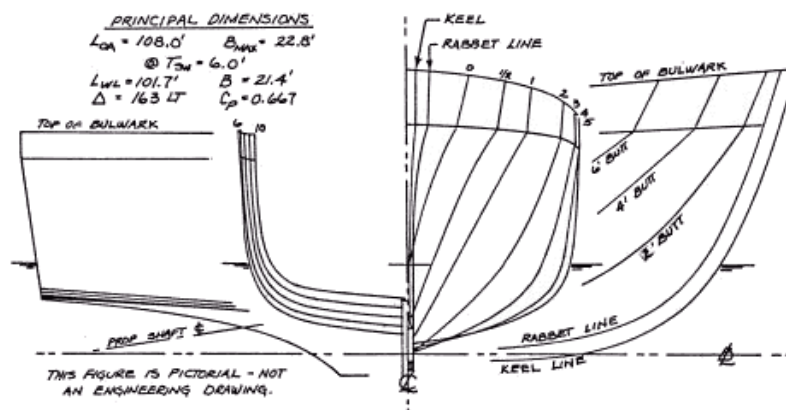


Figura 8.4 Piano di costruzione di una carena semidislocante.

Poiché il maggior effetto di depressione è a poppavia, sarà necessario modificare le forme di poppa in modo tale da aumentare la spinta verticale, fino a raggiungere un assetto orizzontale dello scafo alla velocità desiderata.

Ma certamente, anche le forme di prua subiranno delle modifiche, in maniera tale da affrontare in modo confortevole e sicuro le onde, stabilite dal progetto operativo, alla velocità più elevata che il mezzo può raggiungere.

Quindi le forme di una carena semidislocante saranno a prua più penetranti, mentre a poppa saranno più piatte, con il ginocchio della carena che avrà un raggio piccolo e molte volte sarà anche a spigolo, per avere una maggiore spinta verticale, tale da permettere un assetto il più possibile isocarenico in navigazione.

Lo scafo semiplanante, invece, deriva da una carena a spigolo. La velocità di queste carene, relativamente alla lunghezza, larghezza, angolo di rialzo del fondo e dislocamento, è tale da non permettere all'acqua di allontanarsi dal fianco.

Cioè, questa carena navigherà in un canale d'acqua che ne fascierà i fianchi e ne aumenterà la resistenza.

Anche questa carena, come la semidislocante, poiché si trova in una condizione idrodinamica non perfetta (come quando una carena planante è in fase d'inizio planata, quindi appoppata),

ha la necessità di avere le forme di poppa più portanti, per avere un assetto il più possibile orizzontale per la navigazione.

8.1.2 Le vele

Le vele sono il motore di una barca a vela; esse raccolgono l'energia cinetica del vento e lo trasformano in forza motrice per far muovere la barca. Nel corso degli anni il loro taglio è diventato una scienza governata da modelli matematici e da computer, i materiali sono cambiati e, in relazione all'uso, sono divenuti più o meno sofisticati e costosi.

Per piano velico si intende l'insieme delle vele che un'imbarcazione utilizza in relazione all'andatura, alle condizioni di vento e di mare.

Le vele possono essere classificate in tre categorie in base a come vengono inferite: possono essere vele di strallo, vele inferite e vele ad inferitura libera

- Vele di strallo

- Genoa: è la vela di prua con ricopertura, ovvero con sovrapposizione alla randa. Di solito si considerano "genoa" le vele che vanno dal 130% al 160% di sovrapposizione (la percentuale è riferita alla distanza tra il punto di mura del genoa e la base dell'albero).
- Yankee: issata sullo strallo di prua nasce per essere abbinato alla trinchetta nei cutter e può essere ideale per la bolina larga o laschetto con venti medio-forti per dare potenza alla barca senza farla sbandare troppo. La combinazione delle due vele richiede un'attenta regolazione. E' una vela di prua non grande con il punto di scotta molto alto.
- Trinchetta: è la vela dei venti forti. La trinchetta può essere ingarrocciata su un secondo strallo armato sotto al principale o parallelo. Sulle barche moderne di solito è smontabile per non ostacolare le virate con il genoa. La trinchetta non serve a stringere meglio, in quanto sono le onde a fermare la barca, ma evita che la barca sbandi, riduce gli sforzi sul timone e permette di risalire il vento fino a 60°.

- Staysail: è una vela piccola e di solito non pesante che si issa sotto allo spinnaker. Quando si naviga strallati riesce ad avere una funzione propulsiva e può far guadagnare qualche frazione di nodo. Ma il suo lavoro più utile in navigazione d'altura è di portare alla poggia la barca quando con vento e mare di poppa si rischia la strarza. In alcuni casi può cambiare radicalmente la "timonabilità" della barca.
- Windseeker: veletta di prua quasi scomparsa dalla circolazione, è un fiocco piccolo e leggero che si issa davanti alla randa (non sullo strallo) come deflettore nelle condizioni di bonaccia totale. I pochi aliti di vento che riescono a gonfiarlo possono servire a creare un flusso sulla vela principale e muovere la barca per uscire dai buchi di vento.
- Tormentina/storm sail: è la vela da tempesta. Resta per anni nei gavoni ma quando serve, serve davvero. Consigliata a chi naviga tanto, di fatto è anche una vela di emergenza molto piccola per venti oltre i 35-40 nodi.
- Fiocco olimpico: i piani velici moderni, con tanta randa e poco genoa, in pratica usano il fiocco olimpico che ha la caratteristica di avere una balumina molto verticale sulla coperta, che in pratica corre parallela all'albero. Può dare grandi soddisfazioni di bolina, se si impara a regolarla. Di solito piccole variazioni della tensione scotta e del punto di scotta creano grandi cambiamenti alla forma della vela.
- Reacher: somiglia allo yankee, ma è più grande. E' un genoa con un punto di scotta alto, che serve per bolina larga e lasco.
- Code O: inventata per eludere le regole di stazza nel tentativo di considerare gennaker un genoa e poter portare più vele a bordo, il code zero non è altro che un genoa leggerissimo in dacron o anche in nylon, con taglio cross cut o triradiale, che serve per fare bolina con venti apparenti fino a 10 nodi. È una vela che viene attrezzata su frullino anche se alcuni la preferiscono su uno

strallo autoportante in kevlar. È consigliata a chi ha barche leggere e con armo a 7/8, e va bene dai 30 ai 90 gradi.

- vele Inferite

- Randa con stecche corte: è la randa tradizionale da crociera, ha un taglio a ferzi orizzontali perpendicolari alla balumina, con quattro stecche "corte" parallele ai ferzi. In tal modo il rapporto durata/prestazione sarà in ogni caso molto alto. Non ha caratteristiche tecnologiche di rilievo, ma molto spesso le prestazioni somigliano a quelle di vele più costose e pregiate.
- Randa full battened: la presenza di stecche lunghe e orizzontali rende possibile esagerare con l'allunamento della vela, ovvero la sua estensione verso poppa nella parte alta. Il punto debole è la pressione delle stecche sull'albero, che sulle vele più grandi deve essere assorbita da carrelli con sistemi a sfere o a rulli. Le stecche orizzontali lunghe mantengono la vela tesa e regolata con vento sostenuto mentre la mantengono "spiegata" con vento leggero evitando che la balumina "rientri" su se stessa. La presenza delle stecche ripartisce la tensione su tutta la vela che potrà conservare più a lungo la forma. Il movimento alternativo della randa è rallentato, con conseguente minor fileggiamento e usura. L'estremo della vela full battened è la randa "Fat Head" dei Coppa America che si può diffondere anche sulle barche senza strallo di poppa o con stralli mobili. Queste rande appassionano i velisti perché sono facili e intuitive da regolare con scotta e carrello.
- Randa semisteccata o 2+2: comparata alla full-battened, a parità d'allunamento, ha qualche vantaggio in più per suoi fautori; essa ha infatti le stecche rastremate e più flessibili verso l'interno della vela che permettono di regolare il grasso come su una randa classica. Inoltre non avendo la compressione delle stecche sull'albero, non è montata su carrelli e quindi scivola meglio nella canalina dell'albero in issata o ammainata e durante la presa dei terzaroli. La base della randa può essere inferita sul boma oppure essere libera.

- Mezzana: è la randa dei ketch, ormai in disuso e usata più per tenere la prua verso il vento all'ancora che per una reale propulsione.

- Vele ad Inferitura Libera

- Lo spinnaker: è sempre la vela più divertente ed efficace in tutte le andature portanti, ma la sua potenza e le manovre d'uso pongono problemi di controllo ai neofiti e agli equipaggi ridotti. È una vela simmetrica, realizzata in nylon o in poliestere che può avere un taglio totalmente tri-radiale oppure una zona centrale a ferzi orizzontali. La forma dello spinnaker può variare nelle spalle: la sua parte alta, cioè, può essere più piena e larga della larghezza media della vela, soprattutto se si cercano prestazioni di poppa con venti leggeri, mentre sarà più magro per chi cerca uno spi da traverso o da bolina larga, anche se per questo ormai gli spinnaker asimmetrici sono molto più versatili.
- Asimmetrico: lo spinnaker asimmetrico ha assunto le più disparate denominazioni nel tentativo, sostanzialmente commerciale, di differenziare le vele nelle diverse denominazioni ma molto simili nelle prestazioni. Più in generale si dice gennaker dall'incrocio di spi e genoa. Gli asimmetrici sono diventati l'ottima alternativa allo spi e sono spesso murati su un bompressino che ne allunga la misura della base. Caratteristica fondamentale è che sono nati per barche rapide che costruiscono vento apparente, ragion per cui si finisce per navigare strallati per effetto della velocità.

8.1.3 Maribelle

Maribelle (figura 8.5) è una barca a vela caratterizzata da tubolari pneumatici e può essere pertanto descritta come un ibrido tra una barca a vela e un gommone. L'imbarcazione è stata concepita in modo da garantire un'estrema semplicità di governo e di gestione nonché la massima sicurezza. Più in dettaglio i principi ispiratori del progetto sono stati:

- sicurezza;
- facilità di conduzione;
- leggerezza;
- trasportabilità;
- bassi costi di manutenzione;
- adeguate performance;
- accessibilità.



Figura 8.5 Maribelle

Maribelle è armata con sola randa (armo a cat) e presenta un doppio boma del tipo wishbone. Generalmente l'albero delle barche a vela è insartiato, ovvero sorretto da una serie di cavi, le sartie, che in Maribelle non sono presenti. La randa viene regolata tramite scotta randa a poppa ed un amantiglio a prua che sorregge il boma. L'imbarcazione è priva degli avvolgitori manuali, i winch, che richiederebbero la presenza di due o più persone a bordo.

L'albero può essere smontato, e quindi l'intera imbarcazione può essere trasportata come un gommone su un carrello. Il boma, che svolge la funzione di tendere la vela in senso longitudinale, è comunemente costituito da un'asta a cui sono collegate le due estremità inferiori della vela. In Maribelle viene realizzato, senza nulla togliere alle performance dell'imbarcazione, tramite un doppio arco strutturato, in modo da poter rappresentare un

punto di sostegno per l'equipaggio e ridurre il rischio di urti accidentali fra i naviganti e il boma stesso. La deriva dell'imbarcazione è zavorrata ed è progettata in modo da facilitare l'accesso alle zone di basso fondale. Vi è anche un ampio pozzetto per l'equipaggio, che può ospitare comodamente quattro persone.

Nelle pagine successive si riportano i piani di costruzione dello scafo (figura 8.6), ed il piano velico (figura 8.7) di Maribelle.

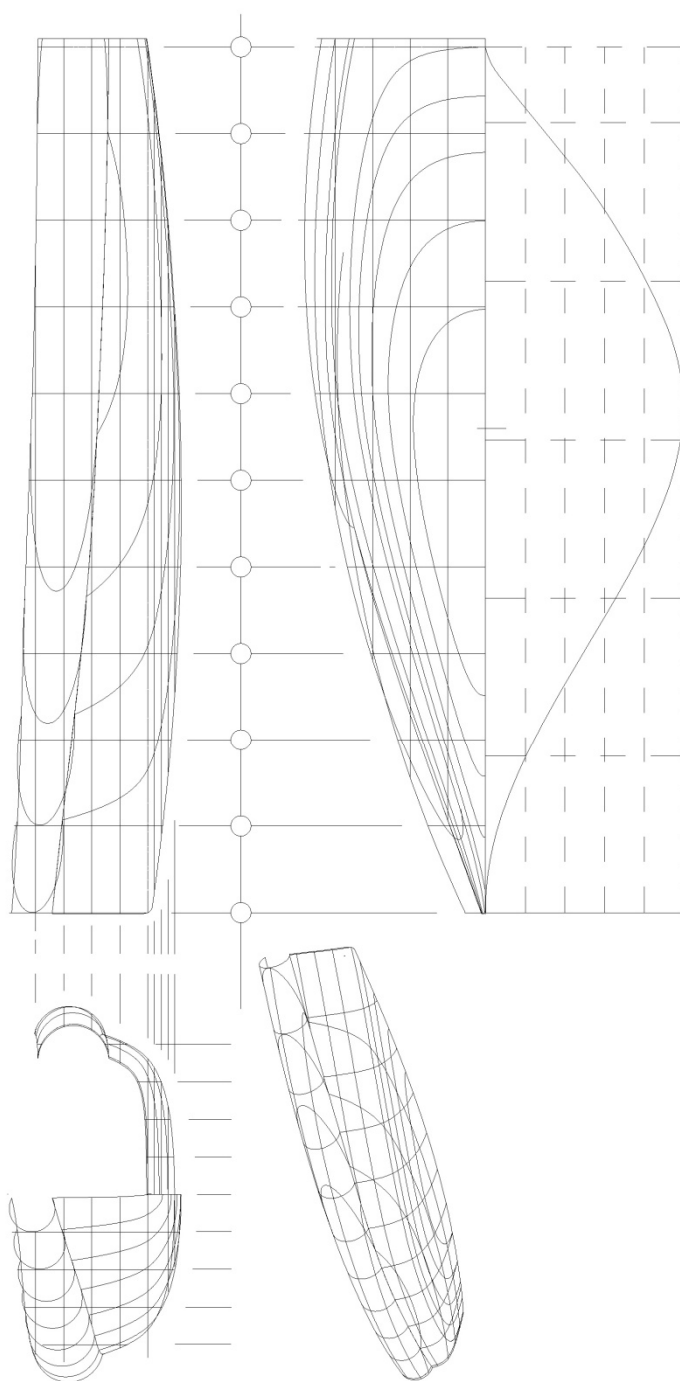


Figura 8.6 Piano di costruzione di Maribelle.

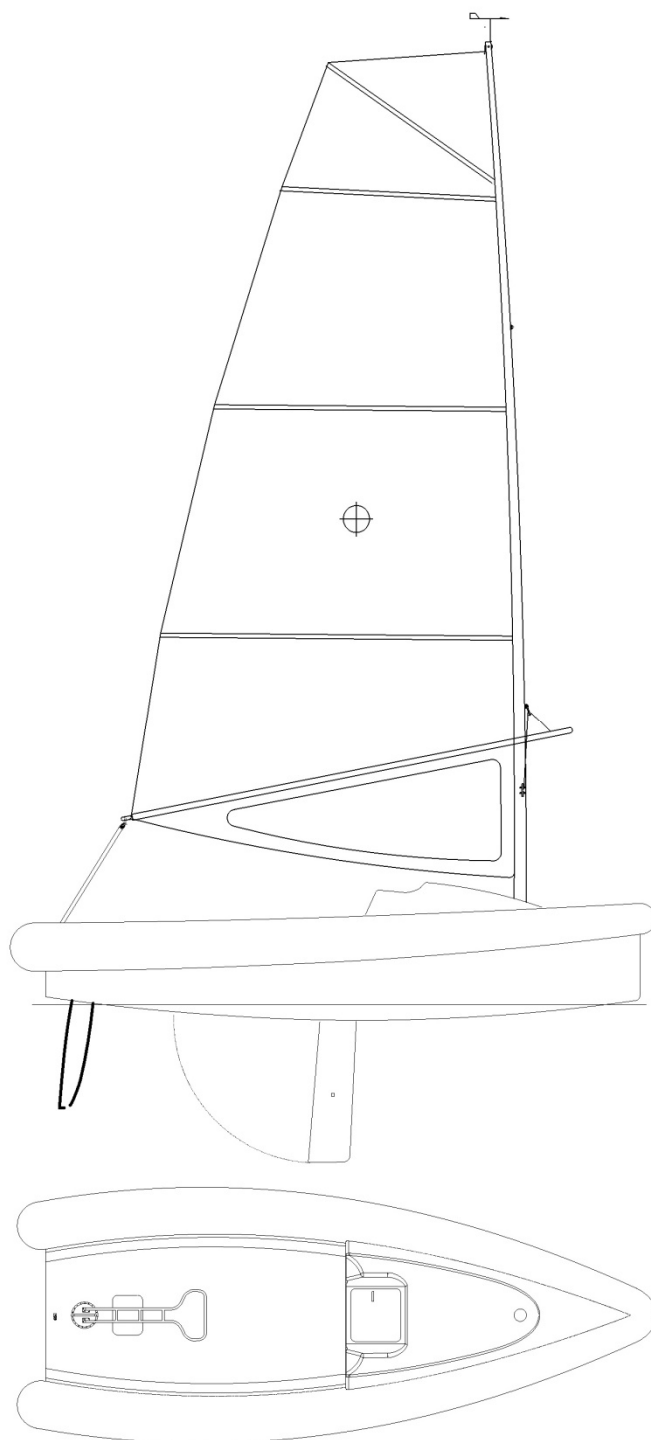


Figura 8.7 Piano velico di Maribelle.

8.2 Analisi delle prestazioni mediante VPP "Windesign"

Il software utilizzato per la predizione delle prestazioni di Maribelle è il "Windesign" della "Wolfson Unit". Il suo funzionamento, spiegato nel dettaglio nelle pagine seguenti, è basato sull'introduzione dei parametri che descrivono la barca (scafo, vele, appendici, equipaggio, ecc..) e dalle condizioni di navigazioni che si vogliono valutare.

Le caratteristiche dello scafo possono essere introdotte direttamente nel VPP compilando gli appositi campi o mediante l'importazione di un file prodotto da un altro software chiamato LPP (Line Processing Program); esso importa un modello CAD dello scafo in oggetto e ne ricava le caratteristiche idrodinamiche da "passare" successivamente al VPP.

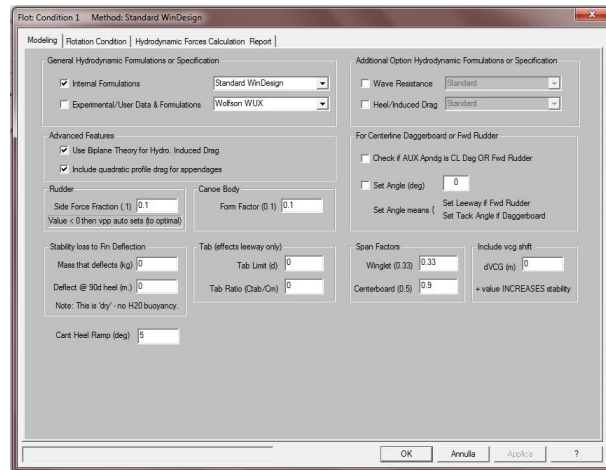
I passi per l'impostazione del lavoro sono elencati di seguito (WinDesign, 2003):

Nella finestra *"Yacht define & automake"* è possibile inserire i dati relativi alle vele (randa, vela di prua, spinnaker, ecc..), il tipo di rig, le dimensioni dell'albero, il numero ed il peso delle persone che compongono l'equipaggio e leggere il file prodotto dal Lines Processing Program (LPP). E' il modo più veloce di definire uno yacht se si dispone di un numero limitato di informazioni.

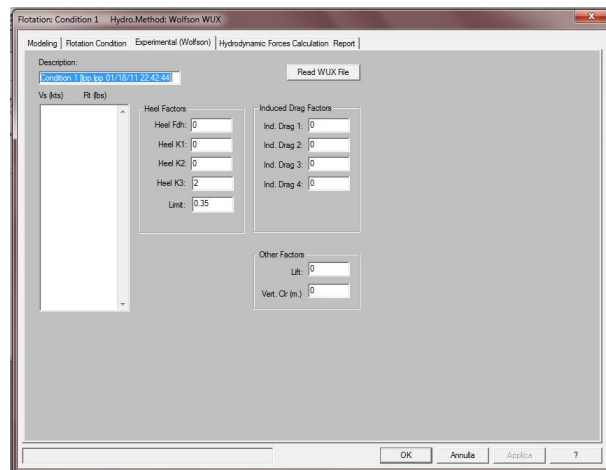
Nella finestra *"Flotation list edit"* è possibile creare, modificare o duplicare una "flotation": il termine "floatation" è utilizzato per rappresentare un unico set di parametri che caratterizzano la parte di scafo utilizzato per i calcoli idrodinamici. Anche in questa finestra è possibile importare un file .lpp con le caratteristiche idrodinamiche dello scafo

in oggetto.

La pagina "Flotation condition" è suddivisa in tre cartelle: "Modelling", "Flotation condition" e "Hydrodynamic forces calculation report". In "Modelling" è possibile scegliere il metodo da utilizzare per la determinazione delle forze agenti sullo scafo; esiste una "formulazione interna", cioè basata su serie sistematiche, e una formulazione basata su "dati sperimentali/fluidodinamici introdotti dall'utente". In questa cartella possiamo anche definire ulteriori parametri riguardanti le appendici. Entrambe le formulazioni sono a loro volta divise in 3 opzioni possibili da scegliere



Qualora, come nel nostro caso, si opti per la formulazione basata su "dati sperimentali/fluidodinamici introdotti dall'utente", compare una nuova cartella con il nome della formulazione scelta che, in questo caso, è "Experimental (Wolfson)" in cui è possibile immettere i dati ricavati da analisi CFD o sperimentali e fattori determinati mediante regressione applicati agli stessi dati.



Nella cartella "*Flotation condition*" è possibile immettere i dati relativi allo scafo quali dislocamento totale, dislocamento del corpo canoa, lunghezza e larghezza al galleggiamento, pescaggio del corpo canoa e massimo, area del piano di galleggiamento, coefficienti prismatici, ecc...

E' possibile anche introdurre parametri relativi alle caratteristiche geometriche delle appendici, al numero ed al peso dell'equipaggio ed allo sbandamento dello scafo.

Flot: Condition 1 Method: Standard WinDesign

Modeling Flotation Condition Hydrodynamic Forces Calculation Report

Description: *Sailor Maribelle* po 01/03/11 22.45.46

Shot: Co 1

Basics

Draft	500	Ax	0.1519
Displ	477.335	Aw	5.6266
Lwl	4.8067	Cp	0.56502
Lunk	5.4678	LCB%	6.17
Bwl	1.6771	LCF%	9.32
Bmax	2.3487	GPR	0.25
Tc	0.1485	Ad+	0
Tmax	1.6461	HBI	1
Trud	1.1461	HL	14.695

Crew

Wt	150	Am	1
----	-----	----	---

Keel

Bulb H/2	0	Length	1.35761
K/R Sep	2.2883	VCB	0.919
		K/Cant	0

Appendages

Fin	1.3337	Wt	0.4238	cm	0.1
Bulb	0				
Rud	0.5479				
Aux	0				

Heel Functions

heel	Wt	rs	heel
0	5.7703	0	4.8067
2	5.717	0.052	4.8536
10	5.198	0.2085	5.1239
25	4.575	0.3032	5.1657
40	4.5938	0.3651	4.9485

VCB 0.082 Advanced

Type of Auxiliary Appendage (Aux)

Non-specific

Winglet

Centerboard

Daggerboard

Rudder Type

Standard

OK Annula Applica ?

La cartella "*Hydrodynamic forces calculatio report*" permette in modo semplice ed immediato di valutare le resistenze fluidodinamiche che agiscono sullo scafo e sulle appendici al variare della velocità, dello sbandamento e del trim.

Flot: Condition 1 Method: Standard WinDesign

Method 1 (Single Point) Calculated Resistance & Other Quantities

Input

Vs (kts)	0
Heel (d)	0
Rh (N)	0
Trim Mom (N-m)	0

Added Resistance in Waves

Method: None

Modal Period (s) 0

Significant H (m) 0

True Wind Angle (d) 0

Wind Speed (kts) 0

Calc

Calc & Clip

Output (Newtons)

Rh	Vacuous Hull	0
Rvk	Vacuous Apndg	0
Rh	Residuary Hull	0
Rvk	Residuary Apndg	0
dRh	Heel Residuary Hull	0
dRvk	Heel Residuary Apndg	0
Ri	Induced	0
Raw	Added R. in Waves	0
RT	Total Resistance	0
Leeway (d)		0

Macellaneous Calcs

Deft WSc	
heel WSc	0
2	0
10	0
25	0
40	0

Method 2 - Make Table of Resistance and Other Quantities

Press Options to specify Vs, Rh and Heel for Table

Options

Clip Table

OK Annula Applica ?

La finestra "*Rig & sail plan*" consente di settare i parametri che definiscono il *rig* della nostra barca e cioè tipo e dimensioni di vele e albero

Rig & Sail Plan - MARIBELLE

Main

P	0
E	3
BAD	1

Fore

IG	0
J	0
LP	0
HBI	0

Spin

ISP	0
SPL	0
SMW	0
SLU	0
SLE	0

Main Mast

MDT1	0.16
MDL1	8
MDT2	0
MDL2	0
TL	0

Mizzen and Mizzen Staysail

PY	0
EY	0
BADY	0
HBIY	0
EB	0

YSF	0
YSMG	0
YSD	0
HBIYS	0

MDT1Y	0
MDL1Y	0
MDT2Y	0
MDL2Y	0
TLY	0

OK Cancel

AUTOMAKE

Sails

Sailsets

Windage

Rig Type

Sloop

2-Masts

IMPORT

Rig Dim's

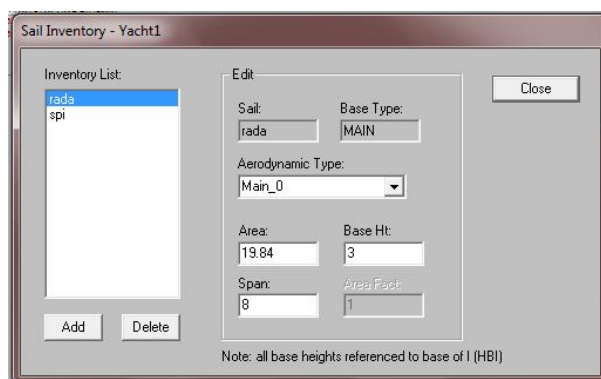
Sails

Sailsets

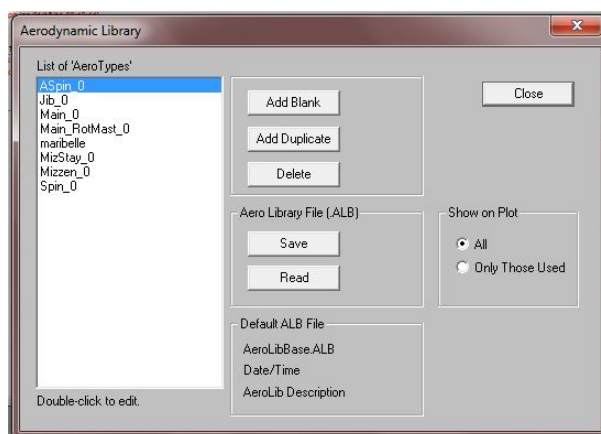
All of above

Select Yacht

Nella finestra "*Sail inventory*" è possibile creare l'inventario delle vele. Il pulsante *Add* permetterà di creare una nuova vela a cui associare un "*Aerodynamic type*", cioè una tipologia di vela tra quelle presenti nella libreria aerodinamica (*Aerodynamic library*). Alla nuova vela è possibile associare i valori dell'area, delle dimensioni di base (*base Ht*) e della apertura (*span*).



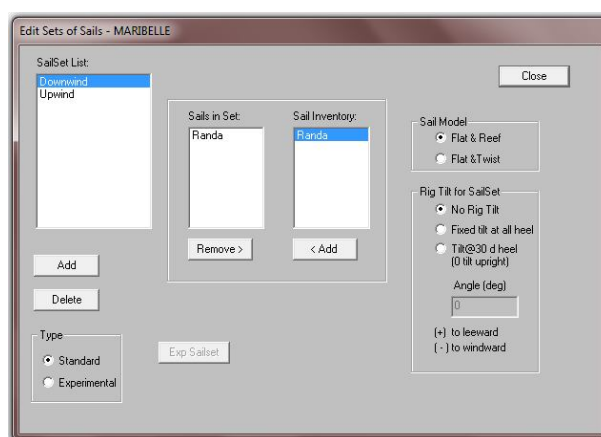
Come detto sopra, la finestra "*Aerodynamic library*" contiene le vele "tipo" e cioè le vele standard che vengono utilizzate per la determinazione delle forze su di esse agenti. In questa finestra è possibile creare, duplicare e modificare dei tipi di vela.



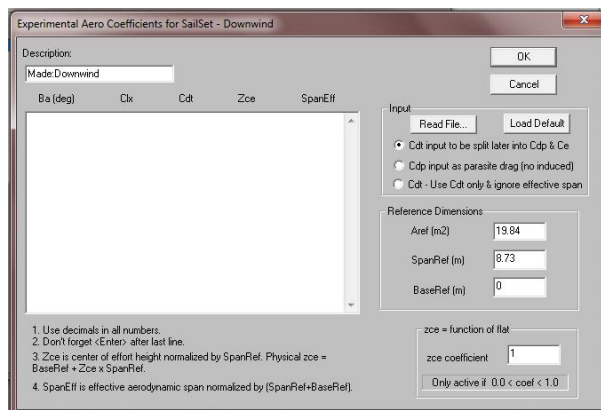
A questo punto, nella finestra "*Edit sets of sails*" è possibile creare il nostro set di vele, cioè quali vele accoppiare in relazione all'andatura da seguire. Generalmente si avranno fiocco/genoa e randa per l'andatura di bolina e spinnaker/gennaker e randa per l'andatura di poppa.

Tramite il tasto *Add* creiamo un'andatura e ad essa associamo le vele scegliendole dal "*Sail inventory*".

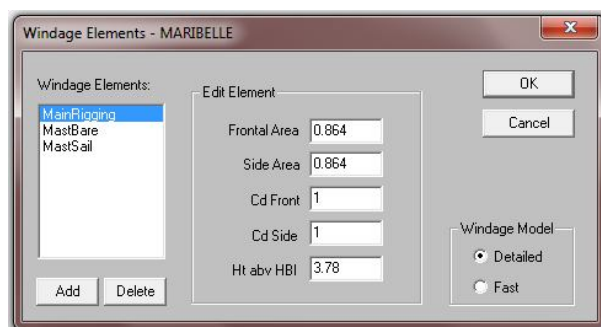
Nel nostro caso avremo soltanto la randa per tutte le andature.



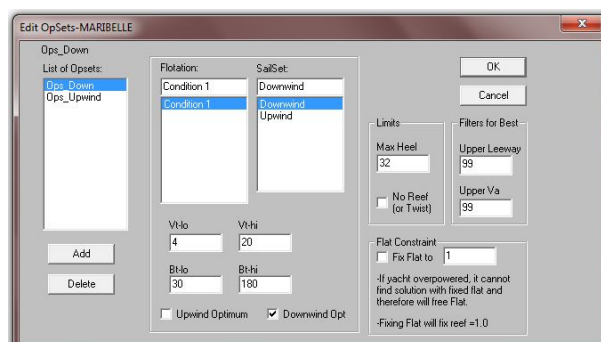
Cliccando sul tasto "Exp sailset", nella finestra precedente si apre la finestra "Experimental aero coefficients for sailset" in cui è possibile introdurre i coefficienti aerodinamici del set di vele utilizzato, ottenuti tramite analisi CFD o sperimentali.



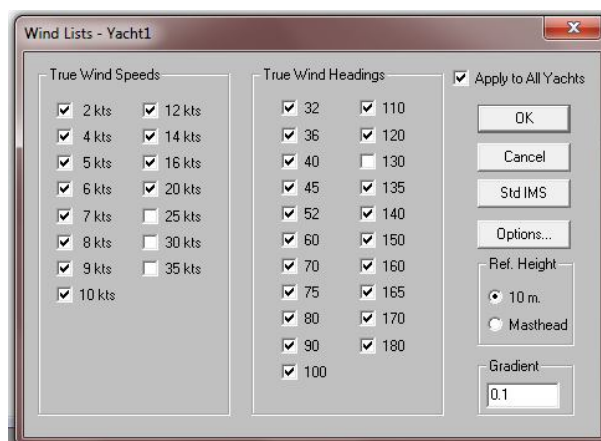
Nella cartella "Windage elements" è possibile introdurre un qualunque elemento che si "oppone" al vento creando resistenza aerodinamica. Per ogni elemento creato si possono impostare i valori dell'area frontale, laterale ed i coefficienti aerodinamici.



Nella cartella "Edit opsets" creeremo gli opset ad ognuno dei quali associeremo i "Flotation" ed i "Sailset". Per ogni opset sarà possibile impostare i range di velocità ed angoli del vento reale.



Nella cartella "Wind lists" sarà possibile scegliere le velocità e gli angoli del vento reale ai quali vogliamo valutare le prestazioni della nostra imbarcazione.



Il tasto "GO" avvia il calcolo.



Abbiamo analizzato Maribelle utilizzando, nel primo caso, la formulazione interna per lo scafo e una randa "tipo" scelta nella libreria aerodinamica e successivamente, utilizzando la formulazione "Wolfson" con dati CFD per lo scafo e le appendici e una randa da noi creata nella libreria aerodinamica inserendo i coefficienti aerodinamici calcolati mediante analisi CFD. Di seguito sono elencati i parametri impostati per scafo e vela:

RANDA	DIMENSIONE	VALORE
P	Dimensione verticale del triangolo della randa	8 m
E	Dimensione longitudinale del triangolo della randa	3 m
BAD	Distanza verticale tra il piano di galleggiamento e la base della randa	1 m

ALBERO	DIMENSIONE	VALORE
MDT1	Dimensione trasversale della sezione dell'albero	0.1 m
MDL1	Dimensione longitudinale della sezione dell'albero	8 m

SCAFO	GRANDEZZA	VALORE
Δ	Dislocamento	500 Kg
Lwl	Lunghezza al galleggiamento	4.80 m
Lsunk	Lunghezza al galleggiamento a scafo "affondato"	5.46 m
Bwl	Larghezza al galleggiamento	1.67 m
Bmax	Larghezza massima	2.34 m
Tc	Pescaggio	0.145 m
Tmax	Pescaggio massimo	1.44 m
Trud	Pescaggio al timone	1.14 m

Ax	Area della sezione massima	0.15 m ²
Awp	Area della sezione di galleggiamento	5.62 m ²
Cp	Coefficiente prismatico	0.56
LCB	Posizione longitudinale del centro di galleggiamento	6.17 (% di Lwl)

APPENDICI	SUPERFICIE BAGNATA	CORDA MEDIA	RAPPORTO TRA SPESSORE E CORDA
DERIVA	0.96 m ²	0.36 m	0.12
TIMONE	0.47 m ²	0.19 m	0.1

EQUIPAGGIO	PESO	BRACCIO
2 persone	150 Kg	1 m

8.3 Analisi CFD di scafo, appendici e piano velico di Maribelle.

In questo paragrafo si riportano le impostazioni delle analisi effettuate sullo scafo, le appendici e la randa di Maribelle. Tutte le analisi sono state effettuate tramite il software Ansys Fluent utilizzando mesh strutturate con elementi esaedrici costruite mediante il software Ansys ICEM.

8.3.1 Scafo

Nelle figure 8.8, 8.9, 8.10 e 8.11 sono mostrate alcune immagini relative alle mesh del volume di controllo dello scafo per il quale è stato considerato soltanto mezzo dominio vista la sua simmetria geometrica e di analisi.

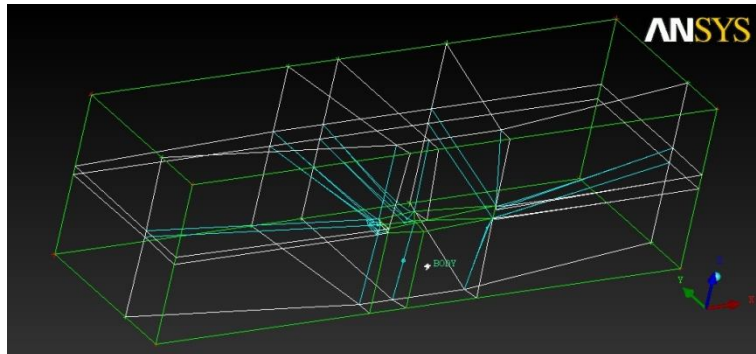


Figura 8.8 Sistema a blocchi del volume di controllo dello scafo.

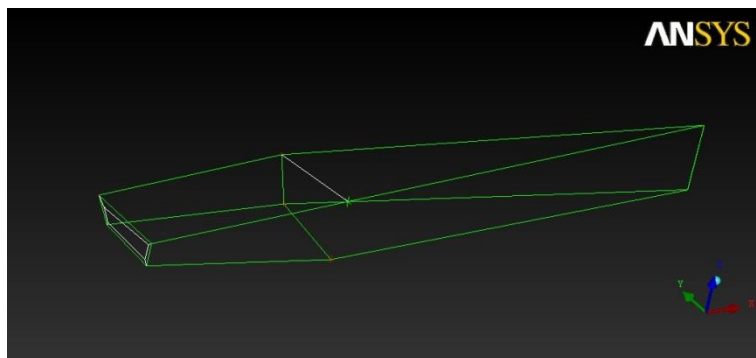


Figura 8.9 Particolare del sistema a blocchi del volume di controllo dello scafo.

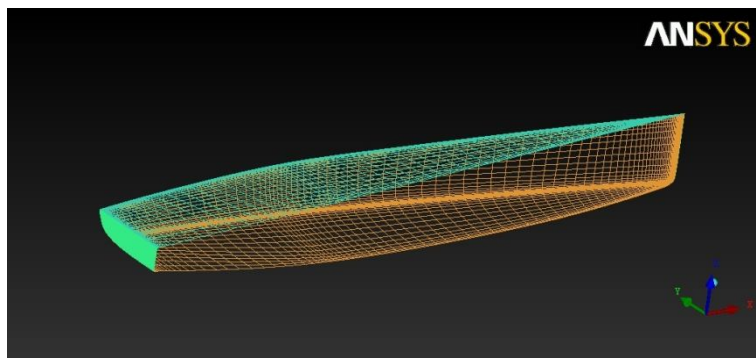


Figura 8.10 Mesh di superficie dello scafo.

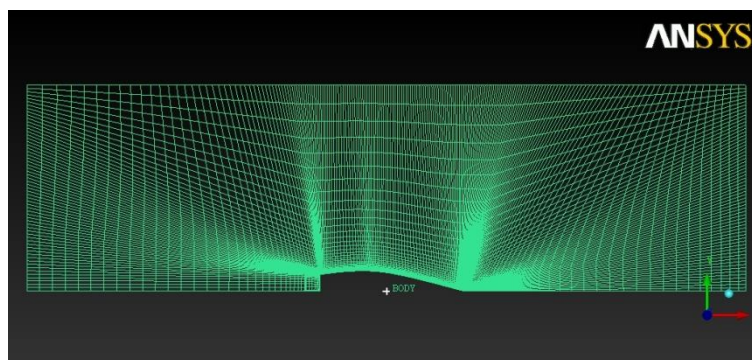


Figura 8.11 Scan plane del piano di galleggiamento.

Per le analisi è stato scelto il modello multifase VOF ed è stata eseguita un'analisi stazionaria utilizzando come modello di turbolenza il k-ε con standard wall functions per lo strato limite. Tra i metodi utilizzati in letteratura scientifica per la determinazione dell'assetto dinamico dello scafo (Azcueta R., 2002), nel nostro caso, per la valutazione del "dynamic sinkage" e cioè dell'affondamento dinamico al quale è soggetto lo scafo durante la navigazione è stata usata la procedura mostrata di seguito (García J. -Espinosa, Oñate E.):

- si esegue un'analisi iniziale considerando il posizionamento verticale dello scafo nella sua condizione di progetto. Dopo la convergenza dell'analisi si ricava la forza verticale agente sullo scafo e si applica la seguente relazione:

$$\Delta z = \frac{F_z}{\rho g A_{wp}}$$

in cui Δz è il valore dell'affondamento dinamico dello scafo, F_z la differenza tra il dislocamento dello scafo e la forza ricavata dall'analisi precedente, ρ la densità dell'acqua, g l'accelerazione di gravità e A_{wp} la superficie al galleggiamento.

- si riposiziona lo scafo applicando la correzione Δz , si ricostruisce una nuova mesh e si effettua una nuova analisi. Se il valore della forza verticale computata nella nuova analisi coincide con il dislocamento dell'imbarcazione il procedimento termina, altrimenti si riapplica la relazione prima esposta e si effettua un'ulteriore analisi; il procedimento termina quando la forza verticale computata eguaglia il dislocamento dell'imbarcazione.

Le analisi sono state effettuate considerando 5 velocità: 1, 2, 3, 4 e 5 metri al secondo. Per ognuna delle analisi è stata applicato il procedimento sopra esposto.

I risultati delle analisi sono schematizzati nella figura 8.12. Nella figura 8.13 è possibile osservare il confronto tra la curva di resistenza dello scafo determinato mediante analisi CFD e quella determinata mediante la formulazione interna di Windesign.

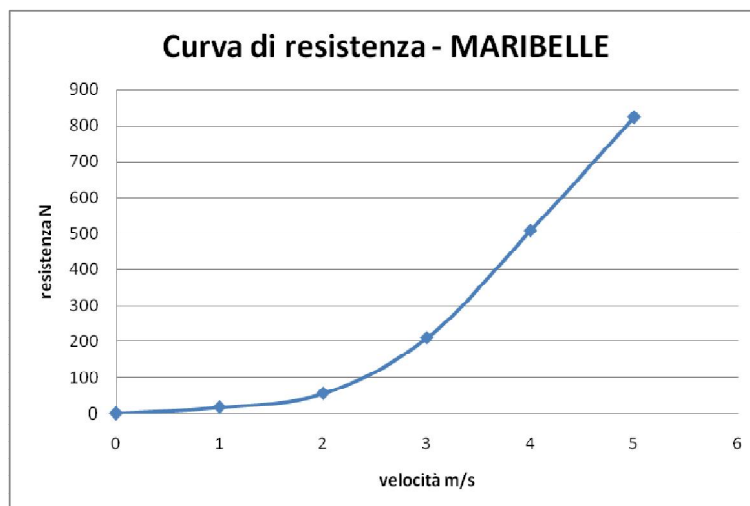


Figura 8.12 Curva di resistenza dello scafo di Maribelle determinata tramite analisi CFD.

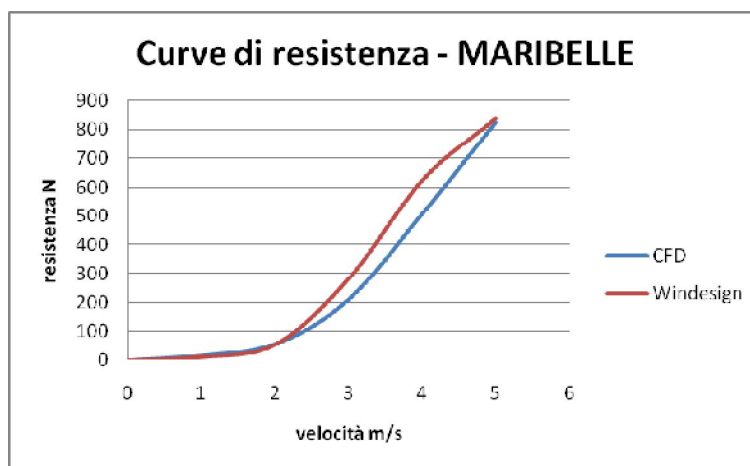


Figura 8.13 Confronto tra la curva di resistenza ottenuta con analisi CFD e tramite formulazione interna di Windesign.

Come è possibile osservare esiste una considerevole differenza tra i valori ottenuti mediante i due metodi. In particolare è interessante notare come la formulazione interna di Windesign sottostimi il valore della resistenza dello scafo a circa 2 nodi e lo sovrastimi a circa 6 nodi. I valori di resistenza sono mostrati nella tabella 8.1.

Tabella 8.1 Valori di resistenza calcolati con i due metodi.

Velocità (m/s)	R (N) Windesign	R (N) CFD
0	0	0
1	12,04	17
2	54,87	56
3	282,39	210
4	624,77	508
5	839,86	824

Nelle figure 8.14, 8.15, 8.16 e 8.17 è possibile vedere la formazione ondosa dello scafo di Maribelle.

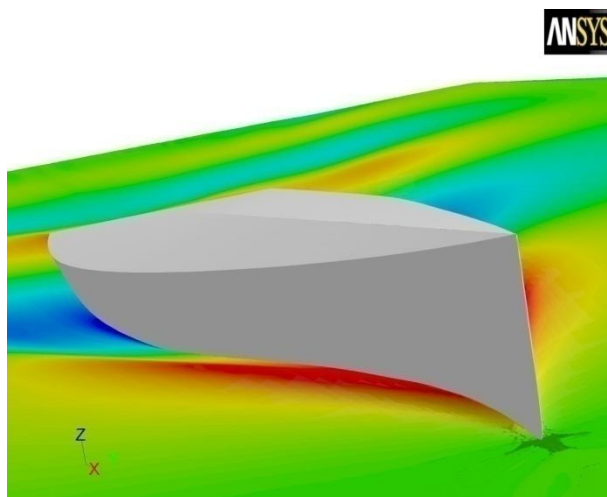


Figura 8.14a Formazione ondosa di Maribelle - particolare della prua.

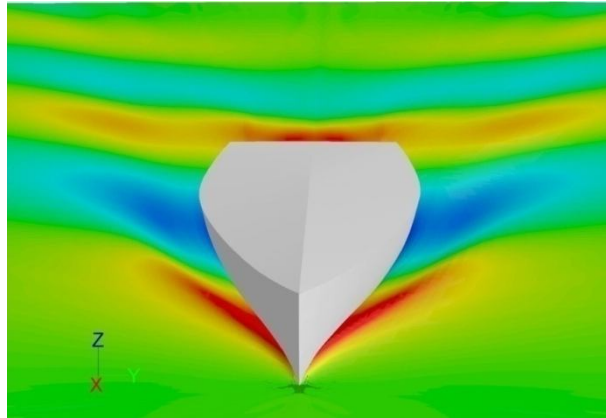


Figura 8.14b Formazione ondosa di Maribelle - treno di onde.

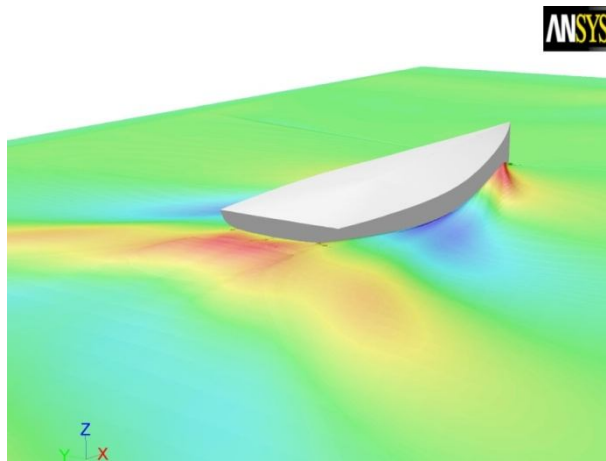


Figura 8.15 Formazione ondosa di Maribelle - treno di onde.

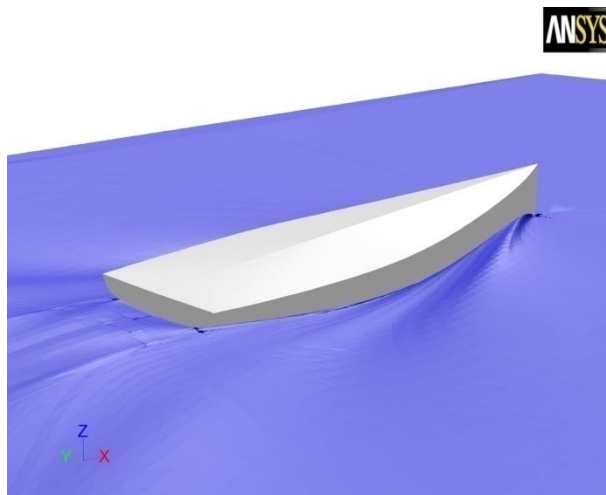


Figura 8.16 Formazione ondosa di Maribelle - onda di prua, cavo dell'onda e onda di poppa.

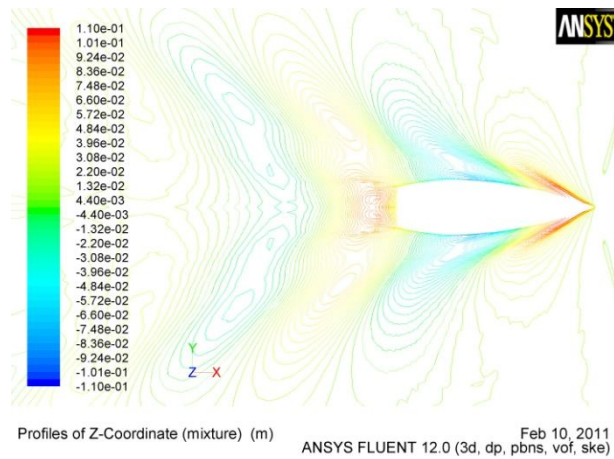


Figura 8.17 Formazione ondosa di Maribelle - profili dei treni d'onda.

8.3.2 Appendici

Anche per le appendici - timone e deriva - sono state costruite mesh strutturate con elementi esaedrici. Le immagini 8.18, 8.19, 8.20 e 8.21 ne mostrano alcuni particolari.

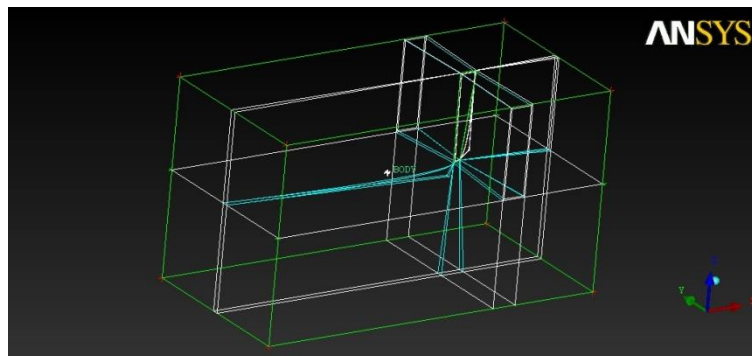


Figura 8.18 Suddivisione a blocchi del volume di controllo del timone.

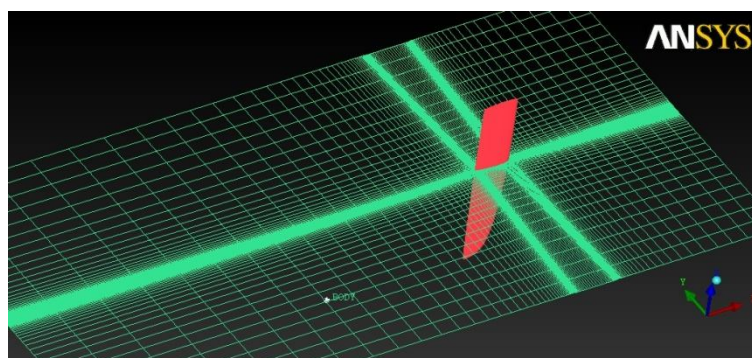


Figura 8.19 Scan plane del volume di controllo del timone.

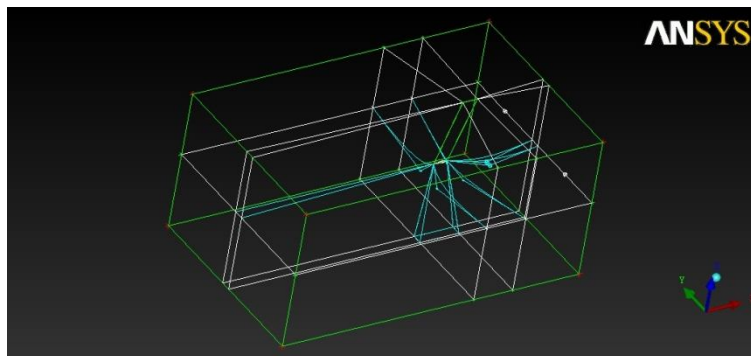


Figura 8.20 Suddivisione a blocchi del volume di controllo della deriva.

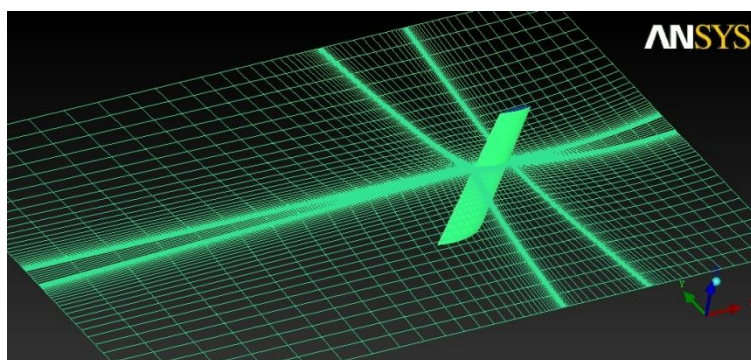


Figura 8.21 Scan plane del volume di controllo della deriva.

I risultati delle analisi CFD su timone e deriva sono mostrati nella figura 8.22.

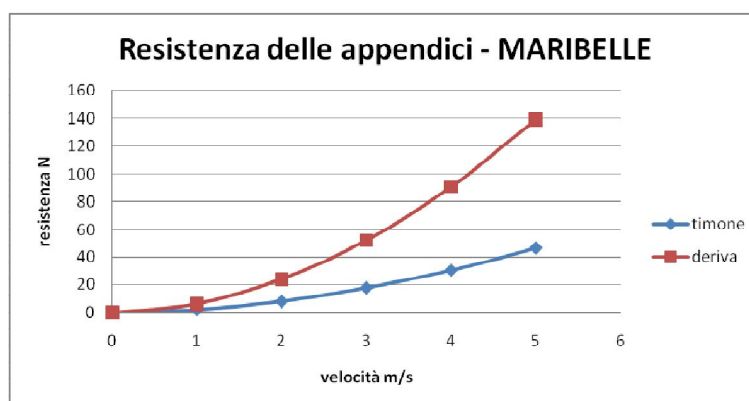


Figura 8.22 Resistenza delle appendici.

Nella figura 8.23 è anche possibile osservare i grafici che mostrano la differenza tra la somma delle resistenze di deriva e timone calcolate con i due metodi. E' interessante notare come la formulazione interna di Windesign sottostimi in maniera considerevole la resistenze delle appendici rispetto alle analisi CFD.

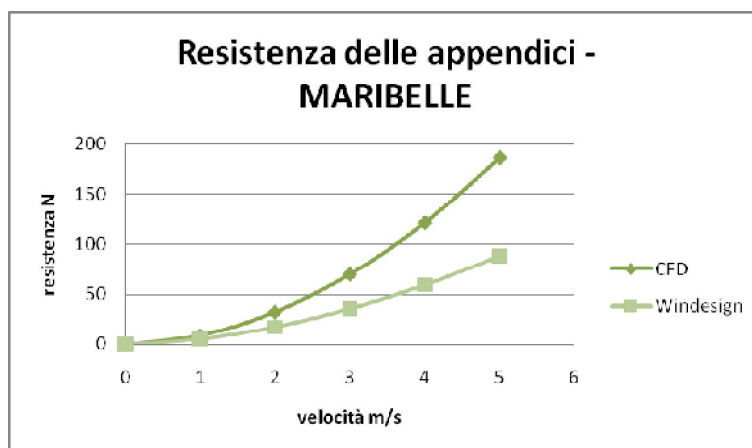


Figura 8.23 Confronto tra la resistenza delle appendici - timone + deriva - calcolata mediante formulazione interna e mediante analisi CFD.

Nella tabella 8.2 sono riportati i valori delle resistenze delle appendici calcolate con i due metodi.

Tabella 8.2 Resistenza delle appendici e variazione percentuale dei valori calcolati con i due metodi.

Velocità m/s	R (N) CFD	R (N) Windesign
0	0	0
1	8,66	5,12
2	32,22	17,28
3	69,79	35,44
4	121,04	59,11
5	185,73	88,1

Nelle figure 8.24 e 8.25 sono mostrate le distribuzioni delle pressioni statiche di timone e deriva su un piano orizzontale che li taglia trasversalmente .

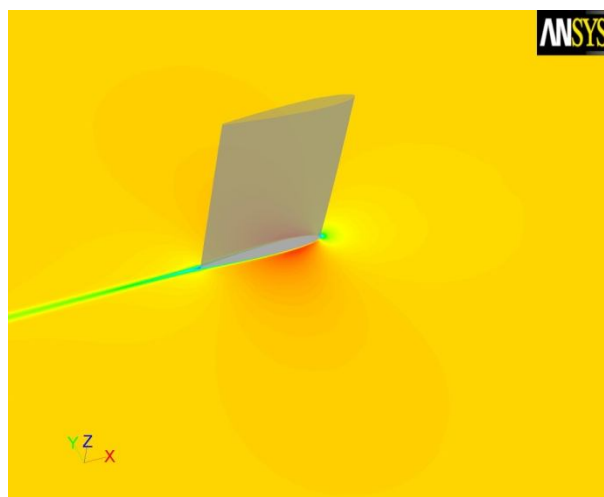


Figura 8.24 Distribuzione della pressione statica del timone su una superficie orizzontale.

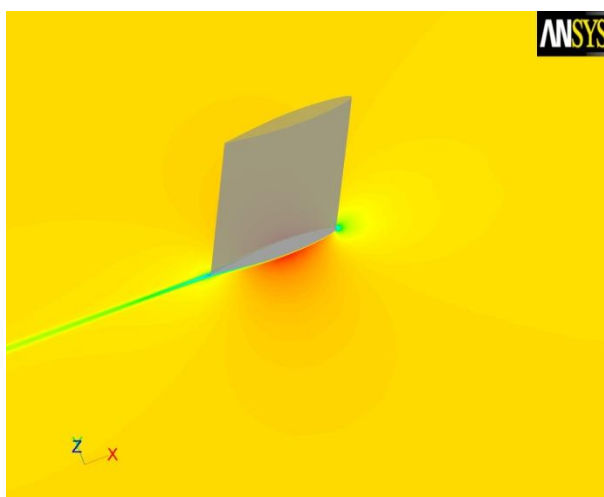


Figura 8.25 Distribuzione della pressione statica della deriva su una superficie orizzontale.

8.3.3 Randa

Come per gli altri elementi di Maribelle anche la mesh della randa è stata costruita mediante struttura a blocchi ed elementi esaedrici. Essa è mostrata nelle figure 8.26, 8.27, 8.28 e 8.29.

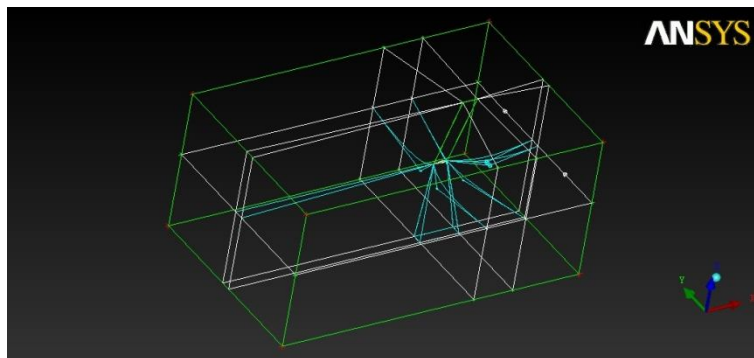


Figura 8.26 Struttura a blocchi del dominio della randa.

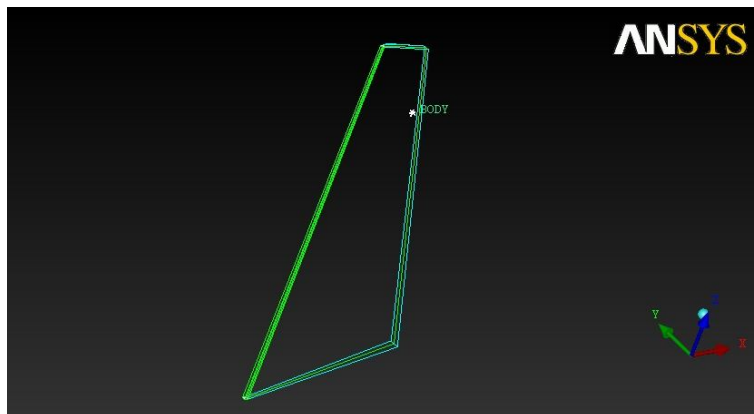


Figura 8.27 Particolare della struttura a blocchi.

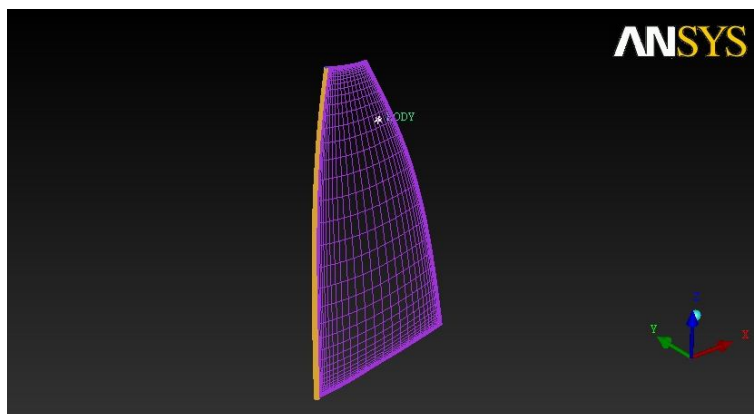


Figura 8.28 Mesh di superficie della randa

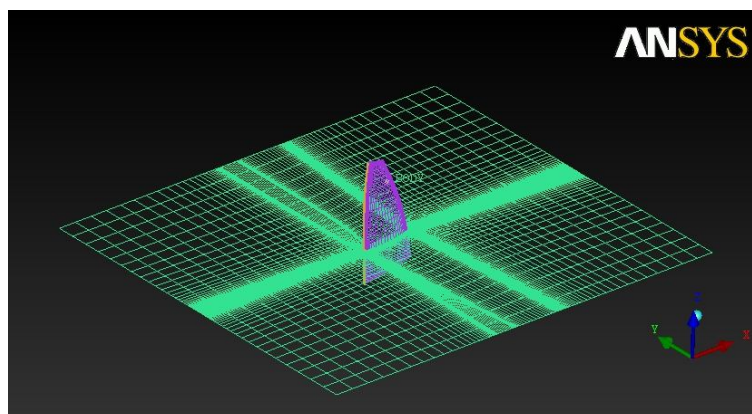


Figura 8.29 Scan plane del dominio della randa.

Le analisi fluidodinamiche hanno prodotto i risultati esposti nella tabella 8.3 in cui vengono messi a confronto con i risultati prodotti dal modello aerodinamico di Windesign.

Tabella 8.3 Coefficienti aerodinamici della randa di Maribelle calcolati mediante CFD e Windesign.

CFD			Windesign		
AWA	CI	Cd	AWA	CI	Cd
0	0,000	0,014	0	0,000	0,048
6	0,79	0,022	6	0,587	0,048
9	0,89	0,038	9	0,837	0,079
12	0,97	0,056	12	1,034	0,111
15	1,04	0,067	15	1,162	0,135
17,5	1,1	0,11	17,5	1,219	0,147
20	1,147	0,16	20	1,252	0,154
22,5	1,16	0,21	22,5	1,274	0,161
25	1,185	0,26	25	1,288	0,167
30	1,185	0,26	30	1,296	0,176
35	1,185	0,26	35	1,285	0,183
40	1,185	0,26	40	1,265	0,189
45	1,185	0,26	45	1,245	0,195
50	1,185	0,26	50	1,227	0,202
55	1,185	0,26	55	1,209	0,212
60	1,185	0,26	60	1,192	0,224
70	1,185	0,26	70	1,157	0,260
75	1,185	0,26	75	1,138	0,285
90	1,24	0,39	90	1,071	0,401
105	1,26	0,52	105	0,978	0,581
115	1,26	0,65	115	0,892	0,714
120	1,17	0,75	120	0,840	0,779

135	1,09	0,84	135	0,648	0,944
140	1,05	0,98	140	0,577	0,988
145	0,95	1,06	145	0,506	1,024
160	0,67	1,1	160	0,290	1,100
170	0,52	1,07	170	0,145	1,132
180	0,000	0,72	180	0,000	1,160

Nelle figure 8.30, 8.31, 8.32 e 8.33 sono mostrate alcune immagini ricavate dalle analisi CFD.

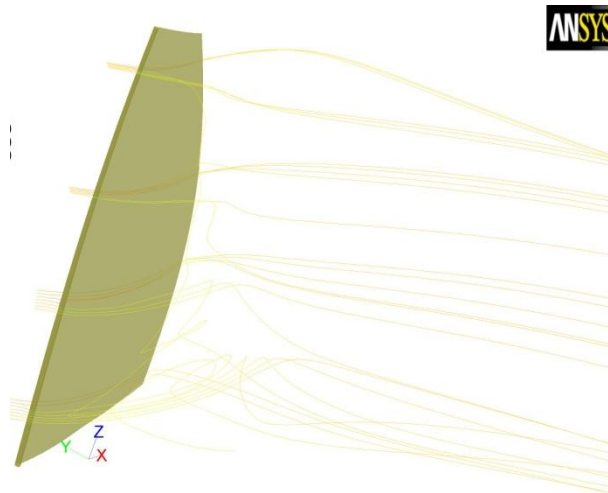


Figura 8.30 Estradosso della randa - pathlines colorate secondo la pressione statica.

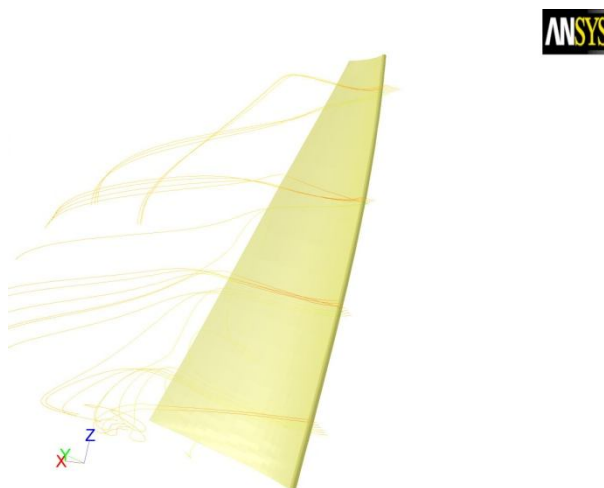


Figura 8.31 Intradosso della randa - pathlines colorate secondo la pressione statica.

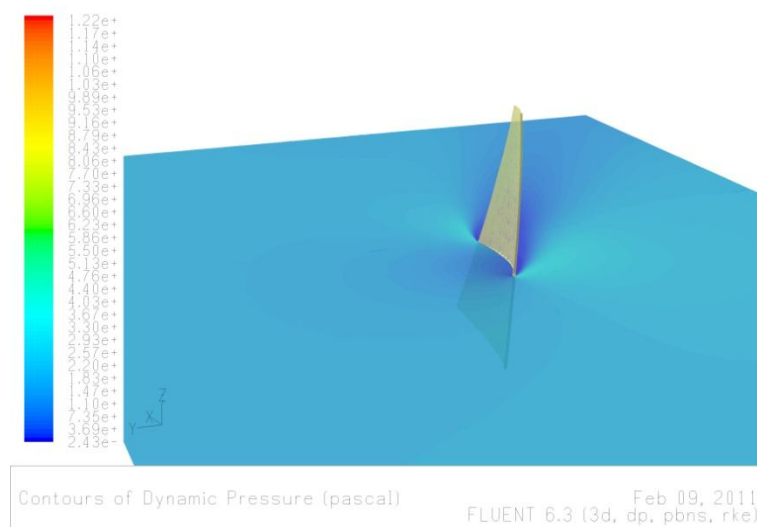


Figura 8.32 Contour della pressione dinamica su un piano che taglia trasversalmente la randa.

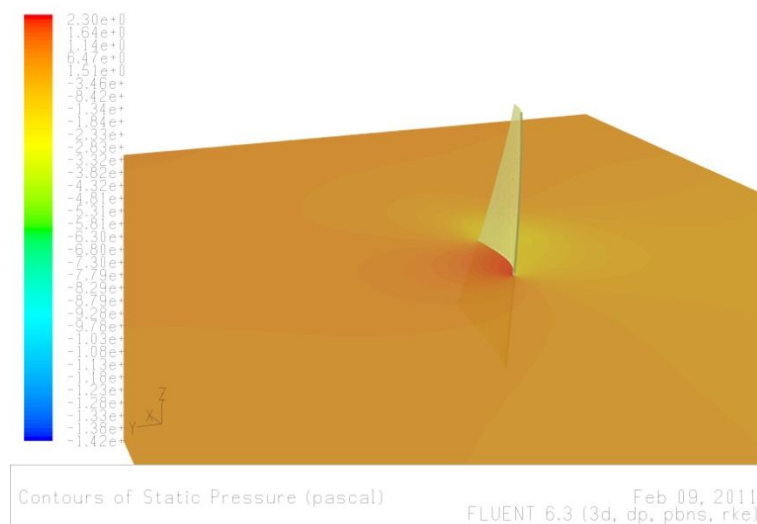


Figura 8.33 Contour della pressione statica su un piano che taglia trasversalmente la randa.

8.4 Risultati del VPP Windesign

I risultati del calcolo effettuato da Windesign sono mostrati in grafici (polari) e tabelle che mostrano le velocità e le forze in funzione della velocità del vento e dell'angolo del vento reale. In questo paragrafo sono mostrate le tabelle relative al "*Best boatspeed*", e cioè alla velocità della barca in funzione di angolo e velocità del vento reale, i diagrammi polari, che

sostanzialmente mostrano le stesse cose ma in forma di grafico e i grafici delle resistenze totali dello scafo e dei coefficienti aerodinamici del piano velico.

I valori numerici sono riportati nella tabella 8.4, per quanto riguarda il calcolo effettuato mediante formulazione interna, e nella tabella 8.5 per quanto riguarda il calcolo effettuato mediante analisi CFD.

Tabella 8.4 Velocità della barca in funzione della velocità (nodi) e dell'angolo (gradi) del vento reale .

Formulazione interna Windesign.

ANGOLO VENTO REALE (gradi)	VELOCITA' VENTO REALE (nodi)											
	2	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	20
32.0	1.00	1.45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
36.0	1.00	1.93	2.45	2.73	3.01	3.68	5.12	7.72	17.95	37.46	69.35	182.63
40.0	1.08	2.31	2.88	3.06	3.25	4.01	5.90	9.51	24.11	52.37	98.84	264.61
45.0	1.26	2.66	3.26	3.32	2.78	2.25	2.46	4.17	15.12	41.08	88.08	269.21
52.0	1.46	3.03	3.65	3.60	3.13	2.66	2.61	3.39	9.10	23.13	48.80	148.36
60.0	1.63	3.32	3.95	3.86	3.43	3.00	2.83	3.18	6.51	15.06	30.93	93.01
70.0	1.75	3.53	4.20	4.15	3.77	3.39	3.26	3.60	6.69	14.58	29.19	86.28
75.0	1.78	3.58	4.28	4.29	3.95	3.10	2.25	2.12	6.91	23.24	56.88	199.16
80.0	1.79	3.61	4.32	4.43	4.13	3.46	2.79	2.58	5.40	15.62	36.94	127.65
90.0	1.77	3.56	4.30	4.69	4.49	4.03	3.58	3.31	4.12	8.02	16.53	53.56
100.0	1.68	3.38	4.14	4.71	4.81	4.55	4.01	3.46	3.73	8.06	19.16	72.48
110.0	1.54	3.14	3.86	4.49	4.92	4.94	4.66	4.16	3.42	4.72	10.11	41.28
120.0	1.36	2.83	3.48	4.11	4.64	5.01	5.10	4.84	4.77	8.18	18.55	74.12
130.0	1.19	2.49	3.10	3.66	4.22	4.68	5.04	5.24	4.79	4.34	5.53	19.40
135.0	1.12	2.34	2.92	3.47	3.97	4.49	4.89	5.19	5.11	5.03	6.31	18.39
140.0	1.06	2.21	2.77	3.30	3.80	4.31	4.73	5.07	5.38	4.91	4.44	7.77
150.0	1.00	2.02	2.54	3.04	3.52	3.97	4.40	4.81	5.39	5.64	5.25	5.39
160.0	1.00	1.89	2.38	2.86	3.32	3.76	4.18	4.57	5.22	5.69	6.12	5.55
165.0	1.00	1.85	2.33	2.80	3.25	3.68	4.11	4.50	5.12	5.62	6.09	6.50
170.0	1.00	1.82	2.29	2.75	3.20	3.63	4.05	4.45	5.08	5.53	6.02	7.04
180.0	1.00	1.81	2.27	2.73	3.18	3.61	4.03	4.43	5.07	5.52	5.96	6.97

Tabella 8.5 Velocità della barca in funzione della velocità (nodi) e dell'angolo (gradi) del vento reale .

Formulazione che utilizza dati CFD.

ANGOLO VENTO REALE (gradi)	VELOCITA' VENTO REALE (nodi)											
	2	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	20
32.0	1.00	1.29	2.09	2.82	3.29	3.32	3.16	2.77	1.73	1.00	1.00	1.00
36.0	1.00	1.50	2.22	2.89	3.30	3.25	3.00	2.66	2.03	1.14	1.00	1.00
40.0	1.00	1.80	2.50	3.07	3.32	3.16	3.12	2.93	2.31	1.24	1.00	1.00
45.0	1.00	2.17	2.89	3.42	3.56	3.52	3.39	3.18	2.54	1.22	1.00	1.00
52.0	1.00	2.62	3.33	3.82	3.87	3.80	3.65	3.47	2.72	1.12	1.00	1.00
60.0	1.00	2.96	3.65	4.11	4.11	4.03	3.91	3.73	2.91	2.17	1.65	1.00
70.0	1.08	3.22	3.89	4.36	4.38	4.32	4.21	4.02	3.77	4.54	7.37	23.32
75.0	1.13	3.31	3.97	4.45	4.50	4.45	4.36	4.17	3.36	2.54	2.57	8.55
80.0	1.16	3.36	4.02	4.51	4.62	4.58	4.50	4.33	3.56	2.79	2.82	8.49
90.0	1.29	3.54	4.19	4.63	4.84	4.84	4.79	4.65	3.55	1.73	0.08	0.88
100.0	1.23	3.46	4.12	4.64	4.93	4.97	4.96	4.87	4.81	5.55	7.92	20.77
110.0	1.13	3.29	3.96	4.50	4.95	5.22	5.29	5.28	5.33	5.94	7.68	16.79
120.0	1.03	3.00	3.71	4.26	4.73	5.15	5.48	5.60	5.55	5.08	4.60	6.05
130.0	1.00	2.69	3.41	3.99	4.48	4.92	5.32	5.68	6.04	5.97	5.27	4.76
135.0	1.00	2.53	3.26	3.84	4.33	4.77	5.18	5.56	6.16	6.41	5.86	5.92
140.0	1.00	2.37	3.09	3.68	4.18	4.62	5.04	5.43	6.15	6.59	6.38	6.89
150.0	1.00	2.08	2.77	3.36	3.86	4.30	4.70	5.08	5.78	6.44	6.98	6.38
160.0	1.00	1.92	2.55	3.12	3.62	4.07	4.48	4.87	5.59	6.26	6.91	8.13
165.0	1.00	1.84	2.44	3.00	3.50	3.94	4.35	4.73	5.45	6.11	6.76	8.09
170.0	1.00	1.77	2.36	2.91	3.40	3.85	4.25	4.63	5.34	6.00	6.63	7.93
180.0	1.00	1.39	1.89	2.39	2.87	3.29	3.68	4.03	4.67	5.26	5.81	6.86

In figura 8.33 ed 8.34 sono mostrati i diagrammi polari per le due formulazioni, mentre nelle figure 8.35 e 8.36 sono mostrati i diagrammi delle resistenze totali. Nelle figure 8.37 e 8.38, infine, sono mostrati i coefficienti aerodinamici del set di vele di Maribelle.

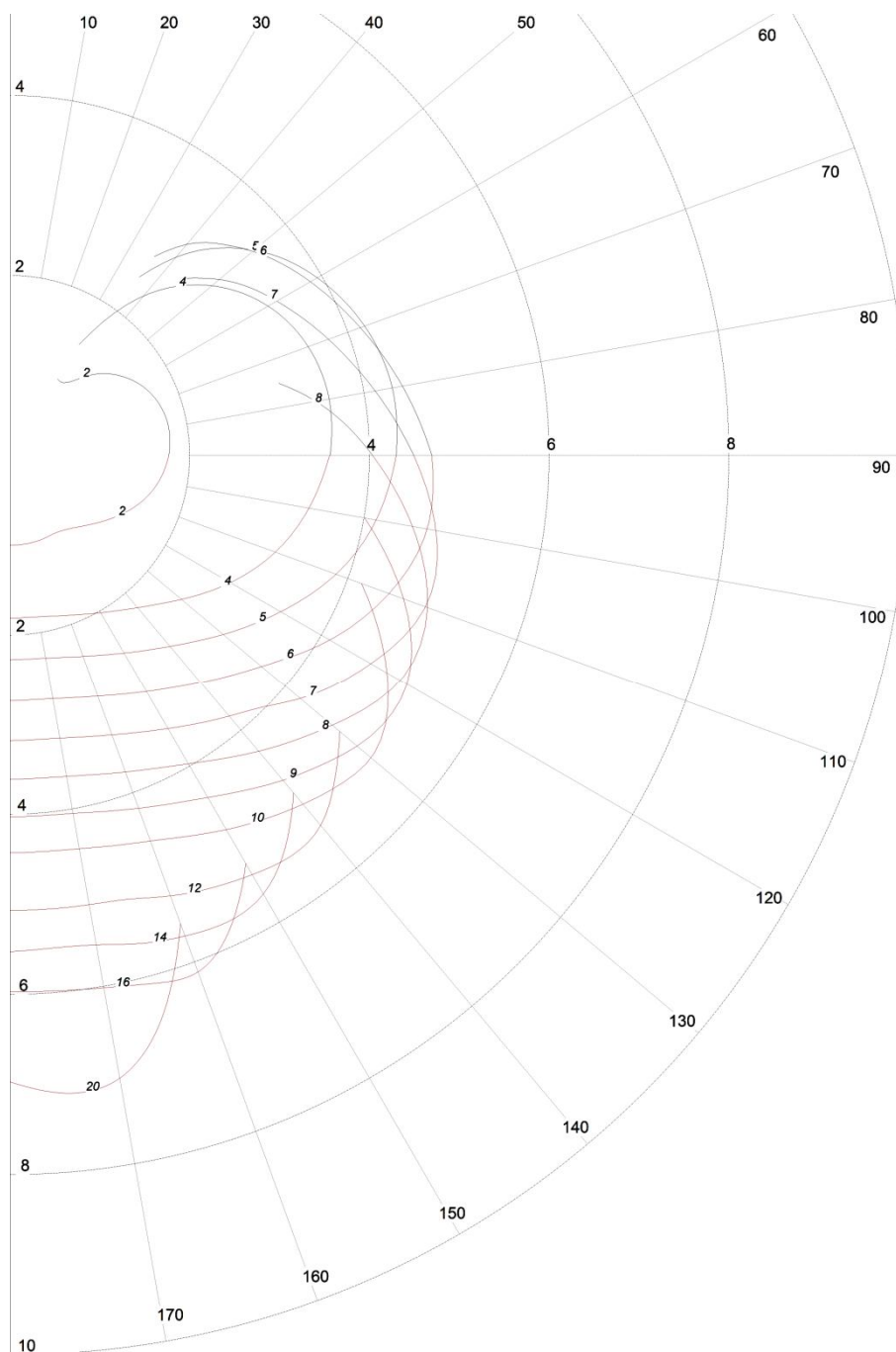


Figura 8.33 Polari di Maribelle calcolate con la formulazione interna di Windesign.

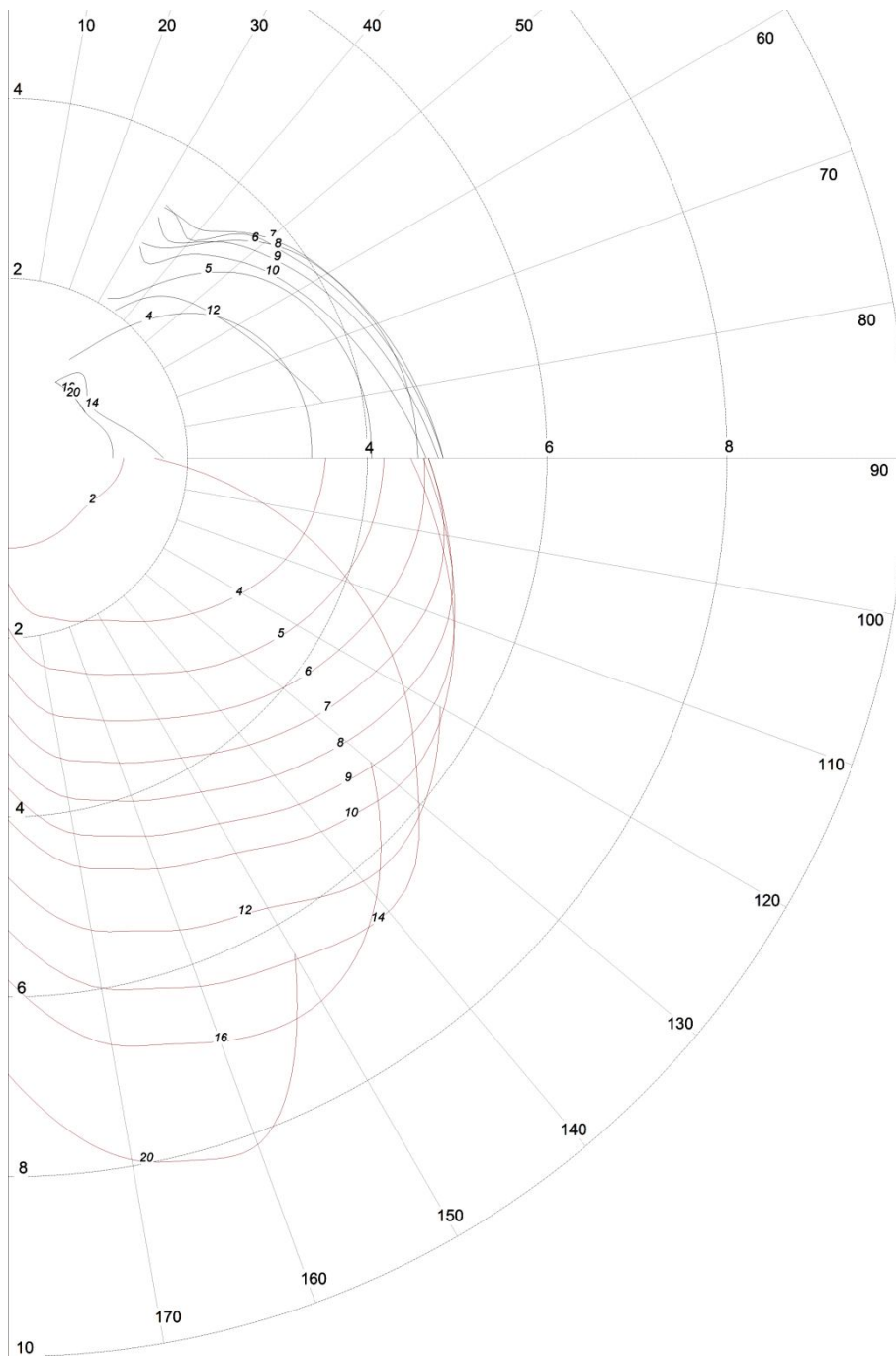


Figura 8.34 Polari di Maribelle calcolate con la formulazione che utilizza dati CFD.

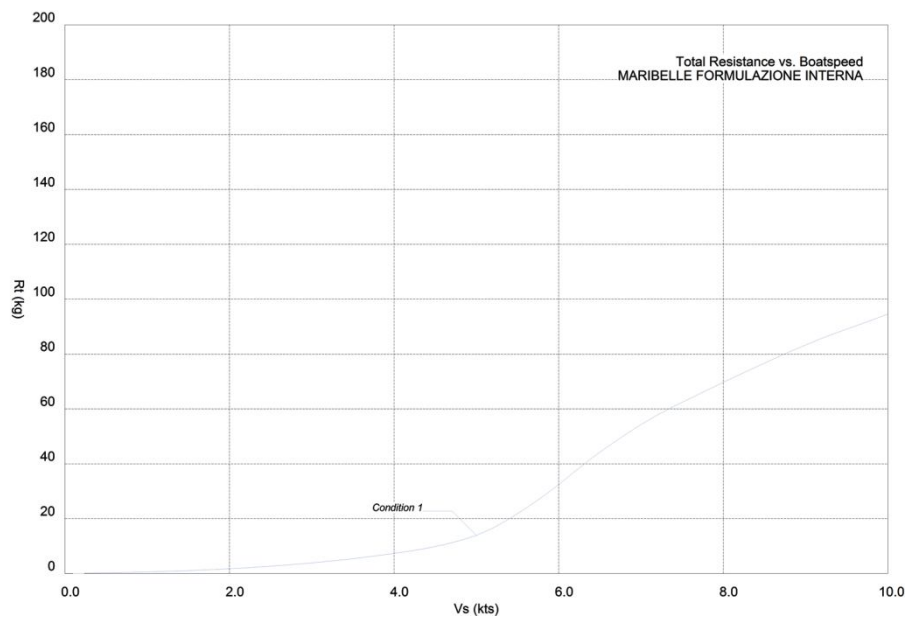


Figura 8.35 Resistena totale di Maribelle calcolata con la formulazione interna di Windesign.

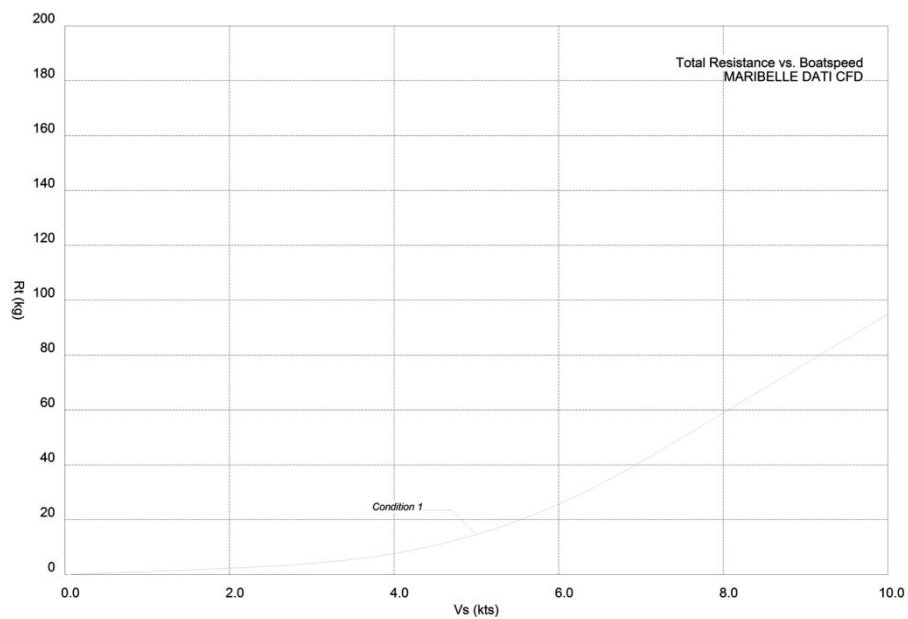


Figura 8.36 Resistenza totale di Maribelle calcolata con la formulazione che utilizza dati CFD.

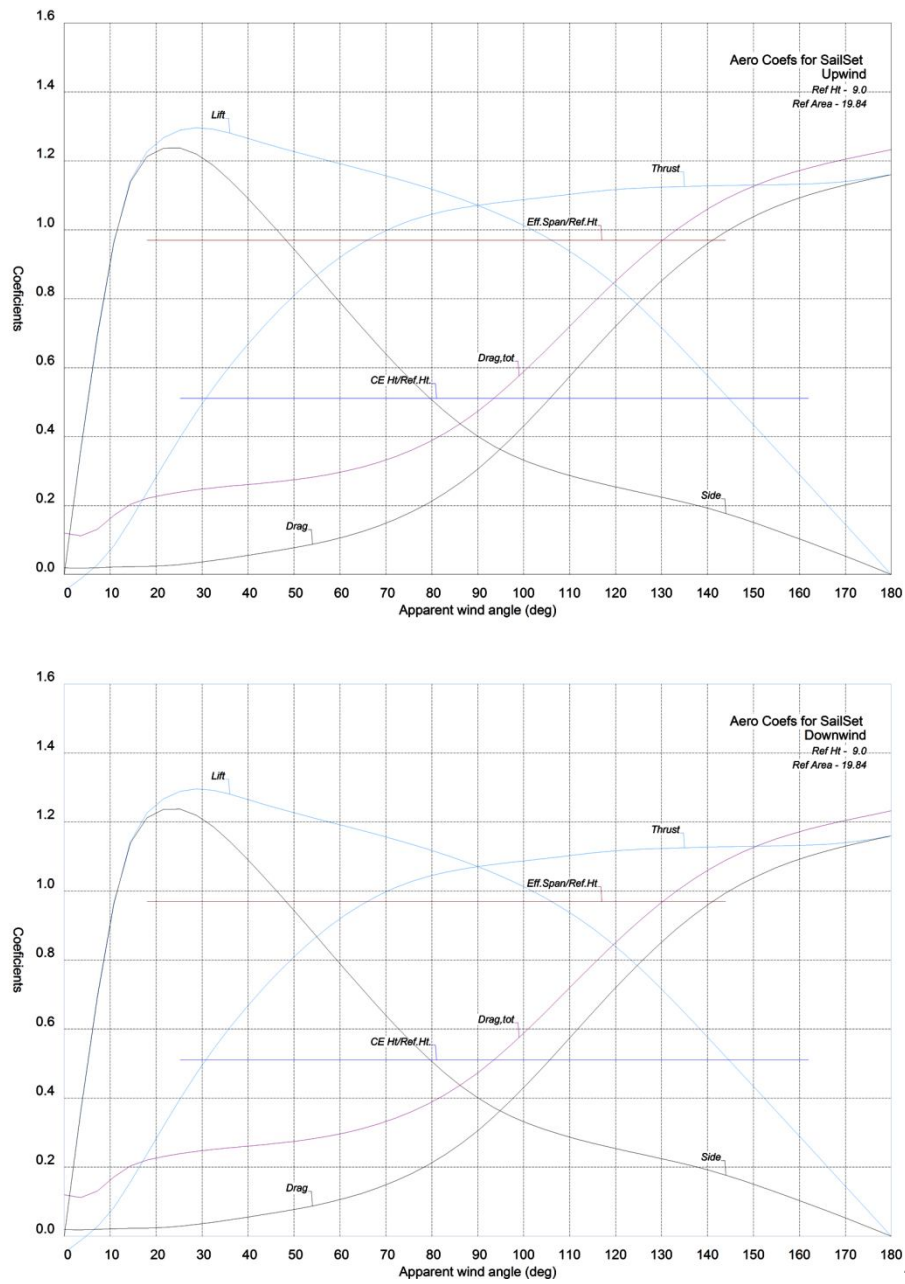


Figura 8.37 Coefficienti aerodinamici di Maribelle calcolati con la formulazione interna di Windesign.

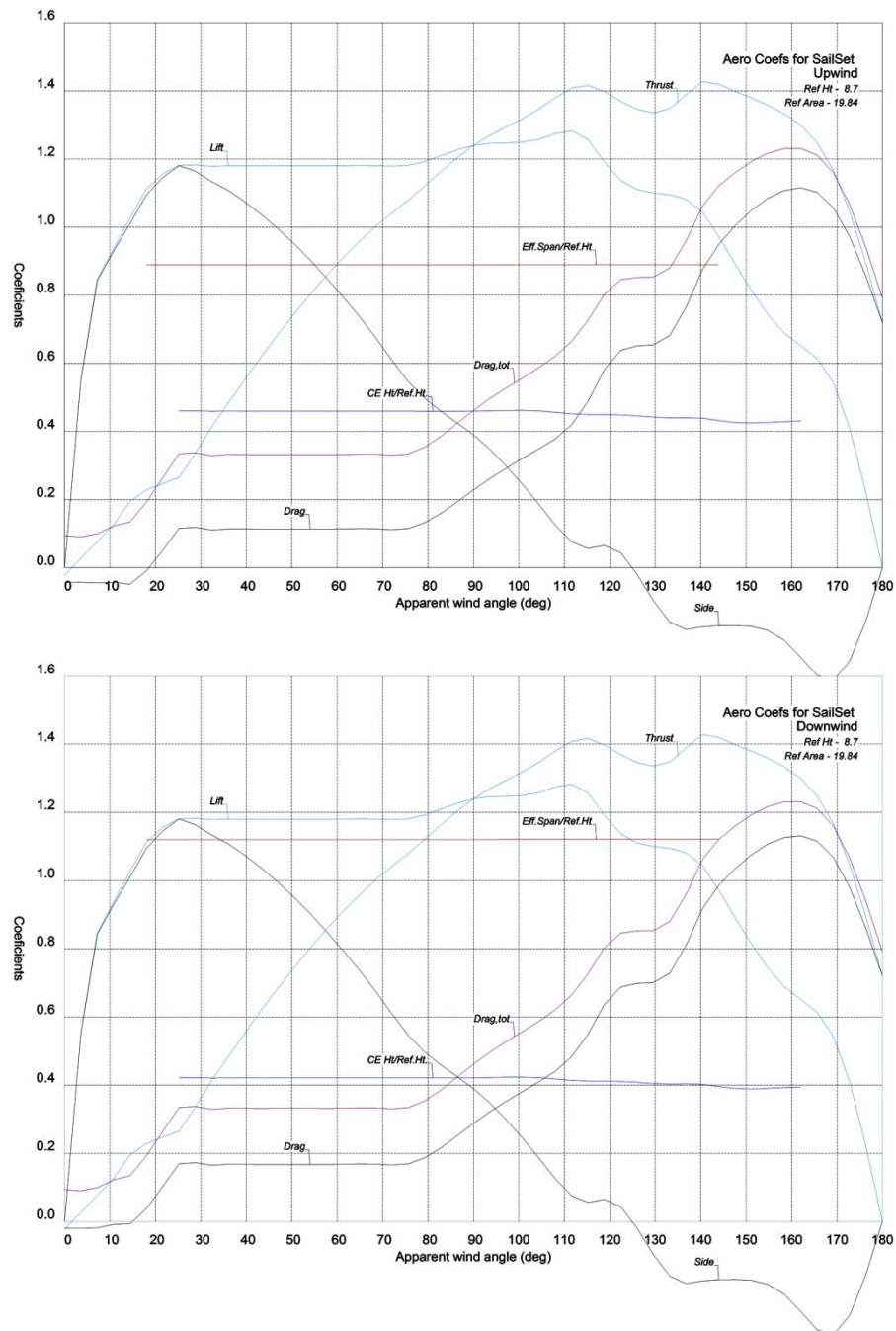


Figura 8.38 Coefficienti aerodinamici di Maribelle calcolati con la formulazione che utilizza dati CFD.

Come è possibile osservare, sia dalle tabelle 8.4 e 8.5 che dalle figure 8.34 e 8.35, i risultati ottenuti con i due metodi si discostano notevolmente tra loro; a titolo esemplificativo prendiamo in considerazione il valore della velocità della barca con vento reale che soffia a 8 nodi e che forma un angolo di 40° con la direzione longitudinale della barca.

Il valore di velocità della barca computato tramite la formulazione interna di Windesign è di 4.01 nodi mentre quella computata con la formulazione che utilizza dati CFD è di 3.16 nodi.

La formulazione interna, cioè, sovrastima la velocità della barca di quasi il 27%.

Se guardiamo la velocità della barca ad un angolo del vento reale di 160° , invece, ci accorgiamo che la formulazione interna sottostima la velocità della barca del 7.6% con una velocità di 4.07 nodi ottenuta mediante la formulazione che utilizza dati CFD e 3.76 nodi con quella interna di Windesign.

E' interessante anche notare come la formulazione interna di Windesign fornisce risultati evidentemente errati per valori della velocità del vento reale superiore a 10 nodi già a valori dell'angolo del vento reale di 36° ; in questo caso, infatti, la velocità computata dal VPP è di 17.95 nodi.

Con la formulazione basata su dati CFD invece, le velocità si mantengono entro limiti attendibili anche ad elevate velocità del vento a cui la barca generalmente rallenta a causa della grande forza laterale che tende a farla sbandare eccessivamente.

I risultati ottenuti dimostrano che l'utilizzo dei codici CFD nella predizione delle prestazioni di un'imbarcazione tramite VPP è di certo utile soprattutto nelle barche da regata in cui la ricerca delle prestazioni è di prioritaria importanza.

In questo caso, infatti, ogni elemento della barca, dallo scafo alle vele, dalle appendici all'equipaggio, dalla distribuzione dei pesi alla pulizia della carena, devono essere attentamente studiati e regolati affinché si possa incrementare il più possibile la velocità della barca; anche mezzo nodo in più, infatti, può determinare la vittoria in una regata in cui tutte le altre barche sono attrezzate per competere al meglio.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Abbott, I.H., Von Doenhoff, A.E., Theory of wing section, Dover Publications, 1959.
- [2] Anderson, J.D., Computational Fluid Dynamics, McGraw-Hill, 1995.
- [3] Ansys Icem, Documentation for ANSYS ICEM CFD 12.0, SAS IP, Inc., 2009.
- [4] Ansys Fluent, Fluent 6.3 User's Guide, Fluent Inc., 2006.
- [5] Azcueta, R., Rans simulations for sailing yachts including dynamic sinkage & trim and unsteady motions in waves, High Performance Yacht Design Conference, Auckland, 4-6 December, 2002.
- [6] Battistin, D., Analisi sperimentale, analitica e numerica della resistenza d'onda della carena Wigley, DINMA, Università degli Studi di Trieste 1999.
- [7] Bruzzone, D., Ferrando, M., Gualeni, P., Numerical and Experimental Investigation Into Resistance Characteristics of Symmetrical and Unsymmetrical Catamaran Hull Forms, Proc. 5th Inter. Symposium on High Speed Marine Vehicles, HSMV99, Capri, Italy 1999.
- [8] Chaughton, Wellicome, Shenoi, Sailing Yacht Design: Theory, 1998.
- [9] Chéret, B., Les voiles. Comprendre, Régler, Optimiser, Mursia 2003.
- [10] Ciortan, C., Guedes, Soares, C., Computational study of sail performance in upwind condition, Ocean Engineering 34 (2007) 2198–2206.
- [11] Clauss, G., Heisen, W., CFD Analysis On The Flying Shape of Modern Yacht Sails, 12th International Congress of the International Maritime Association of the Mediterranean - Lisbon, 26-30 September 2005.
- [12] Crepaz, Teoria e progetto di imbarcazioni a vela, Zanichelli, Bologna 1990.

- [13] Damiano, C., Stroligo, M., Virzi Mariotti, G., Zotti, I., Theoretical and Experiment Comparison between the Resistance Componets of a Catamaran in Different Configurations, Nav 2009, Messina.
- [14] Fossati, F. , Diana, G. , Principi di funzionamento di un'imbarcazione a vela, Schonenfeld & Ziegler , Milano 2004.
- [15] Garrett, R. , Fisica della vela, Zanichelli 1990.
- [16] Hedges, K.L., Richards, P.J., Mallinson, G.D., Computer modelling of downwind sails, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 63 (1996) 95-110.
- [17] Hoerner, S.F., Fluid dynamic drag, Hoerner 1965.
- [18] Hoppe, G.W., The Hysucat Development, Mechanical Engineering Department University of Stellenbosch, RSA, 1989.
- [19] García, J. -Espinosa, Oñate E., Fluid dynamic analysis of america's cup boats including dynamic sinkage and trim effects, Marnet-CFD Final Workshop.
- [20] Katz, J., Race car aerodynamics - Designing for speed, Bentley Publishers 1995.
- [21] Jackson, P.S., Modelling the aerodynamics of upwind sails, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 63 (1996) 17-34.
- [22] Jacquin, E., Roux Y., Guillerm, P.E., Alessandrini, B., Toward numerical VPP with the full coupling of hydrodynamic and aerodynamic solvers for ACC yacht, 17th Chesapeake Sailing Yacht Symposium, Mar. 2005.
- [23] Korpus, R., Performance Prediction without Empiricism: A RANS-Based VPP and Design Optimization Capability, THE 18th CHESAPEAKE SAILING YACHT SYMPOSIUM, Mar. 2007.
- [24] Larsson, L., Eliasson, R.E., Principles of Yacht Design, Adlard Coles Nautical, London 1997.
- [25] Lasher William, C., Sonnenmeier, James, R., An analysis of practical RANS simulations for spinnaker aerodynamics, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 96 (2008) 143–165.
- [26] Manan Desai, Channiwala, S.A., Nagarsheth, H.J., Experimental and Computational Aerodynamic Investigations of a Car, Wseas Transactions on Fluid Mechanics, Oct. 2008.

- [27] Mancuso, A., Parametric Design of Sailing Hull Shapes, Ocean Engineering (Elsevier), Vol.33 (2006) pp. 234-246 .
- [28] Marchaj, C.A., Teoria e pratica della vela Mursia, Milano, 1976.
- [29] Maria Viola, I., Downwind sail aerodynamics: A CFD investigation with high grid resolution, Ocean Engineering 36 (2009) 974–984.
- [30] ORC VPP Documentation 2009.
- [31] Richards, P.J., The effect of wind profile and twist on downwind sail performance, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 67&68 (1997) 313-321.
- [32] Richards, P.J., Johnson, A., Stanton, A., America's Cup downwind sails vertical wings or horizontal parachutes?, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 89 (2001) 1565–1577.
- [33] Salas, M., Luco, R., Sahoo, P.K., Browne, N., López, M., "Experimental and CFD Resistance Calculation of a Small Fast Catamaran" in Proc. of High Performance Yacht Design Conference.
- [34] Schlageter, E.C., Teeters, J.R., Performance Prediction Software for IACC Yachts, Proceedings of the 11th Chesapeake Sailing Yacht Symposium, Jan., 1993.
- [35] Van Oossanen, P., Predicting the speed of Sailing Yachts, Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers, Vol. 101, 1993.
- [36] Versteeg, H.K., Malalasekera, W., An introduction to Computational Fluid Dynamics, Prentice Hall, 1995.
- [37] Wilcox, D.C., Turbulence Modeling for CFD, DCW Industries Inc., La Canada, California, 1998.
- [38] WinDesign, Yacht Performance Prediction software, User's Guide, Version 4.0, Yacht Research International, Inc., 2003.
- [39] Xia, F., Numerical calculations of ship flows with special emphasis on the free surface potential flow, PhD thesis, Div. of Marine Hydrodynamics, Chalmers Univ. of Technology, Goteborg, Sweden 1986.